

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SENKRONİZASYON  
VE SİSTEM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KESKİN**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**EYLÜL 2025  
İSTANBUL**

**T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SENKRONİZASYON  
VE SİSTEM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KESKİN  
(231280005)**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

**İstanbul 2025**



T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

26.09.2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 29.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

**Prof. Dr. Nuran YÖRÜKEREN**

Üye (İmza)

Kocaeli Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Uğur YERDEN**

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Elektrik Üretim Sistemlerinde Senkronizasyon ve Sistem Verimliliğinin İyileştirilmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadar geçen tüm süreçlerde bilimsel ahlâk ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (05/09/2025)

Mustafa KESKİN

## İTHAF

Bu tez çalışması süresince desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanı hocam Prof. Dr. Feriha Erfan KUYUMCU'ya, ayrıca çalışmam sırasında manevi desteklerini hiç eksik etmeyen eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.



## ÖNSÖZ

Son yıllarda önemi gittikçe artan ve bu nedenle stratejik konu haline gelen enerji ihtiyacı, önümüzdeki yıllarda da temel sorunlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Üretilen enerjiyi depolamanın çok kısıtlı olduğu dikkate alındığında, enerji santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin verimli kullanılması önem arz etmektedir.

Elektrik enerjisini üretimi genel olarak birden çok senkron generatörün paralel olarak bağlanması suretiyle elde edilmektedir. Bu durum sistemin arızalara olan tolerans değerini arttırıp, bakım maliyetini azalttığı gibi, sistemin daha verimli çalışmasını ve daha yüksek güç elde edilmesini sağlamaktadır.

Senkron Generatörler (alternatörler) tarafından üretilen elektrik enerjisinin verimliliği, başka bir deyişle kayıpların en aza indirilmesi konusu da bu tez çalışmasında işlenecektir. Gerek üretim tesislerindeki iyileştirmeler gerekse iletim ve dağıtım proseslerindeki iyileştirme çalışmalarından bahsedilecektir.

Tez çalışmam süresince desteğinin esirgemeyen ve verdiği fikir, eleştiri ve yönlendirmeleriyle tez çalışmamın olgunlaşmasını sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Feriha Erfan KUYUMCU'ya çok teşekkür ederim.

Eylül 2025

Mustafa KESKİN  
(Elektrik Mühendisi)

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 2024 Yılı itibariyle Türkiye'nin Elektrik Sektör Raporu .....	1
1.2 Kaynaklarına Göre Elektrik Üretim Kapasitesi .....	2
1.3 Tezin Amacı .....	5
1.4 Literatür Araştırması .....	6
<b>2. SENKRON GENERATÖRLER</b> .....	<b>7</b>
2.1 Genel Bilgiler .....	7
2.2 Senkron Generatörlerin Yapısı.....	7
2.3 Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi .....	8
2.4 Senkron Generatörde Elektriksel Güç ve Döndürme Momenti .....	12
2.5 Senkron Generatörde Reaktif Güç Ayarı .....	14
<b>3. SENKRON GENERATÖRLERDE SENKRONİZASYON</b> .....	<b>16</b>
3.1 Senkronizasyon Yöntemleri .....	17
3.1.1 Manuel senkronizasyon .....	17
3.1.2 Otomatik senkronizasyon .....	20
3.2 Generatörler İçin Devreye Alma Senaryoları.....	24
3.3 Hidroelektrik Santralında Woodward SPM-D10/YB Rölesi ile Senkronizasyon Şartlarının İncelenmesi.....	26
3.4 Hatalı Senkronizasyon Durumları .....	27
3.4.1 Gerilim eşitsizliği .....	27

3.4.2 Faz açılarının eşitsizliği .....	27
3.4.3 Frekans eşitsizliği .....	27
3.5 Senkronizasyon Koruma ve Kumanda Panosu .....	31
3.6 Senkronizasyon Rölesinin Konfigürasyonu .....	35
<b>4. ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SİSTEM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>37</b>
4.1 Elektrik Üretim Santral Türleri ve Verimlilikleri .....	37
4.1.1 Fosil yakıtlı santraller (termik santraller) .....	37
4.1.1.1 Kömür ve linyit yakıtlı santraller.....	37
4.1.1.2 Doğalgaz santralleri .....	38
4.1.1.3 Petrol santralleri.....	38
4.1.2 Yenilenebilir enerji santralleri .....	38
4.1.2.1 Güneş (solar) enerji santralleri.....	38
4.1.2.2 Rüzgar enerjisi .....	39
4.1.2.3 Hidroelektrik santraller .....	39
4.1.2.4 Biyokütle santralleri.....	40
4.1.3 Nükleer enerji santralleri .....	40
4.1.4 Üretim verimliliklerinin karşılaştırılması ve kayıplar .....	41
4.1.4.1 Mekanik kayıplar ve verim .....	42
4.1.4.2 Elektriksel kayıplar ve verim.....	44
4.2 Süperiletkenlik ve Verim .....	45
4.3.1 Süperiletkenlerin temel özellikleri.....	46
4.3.2 Süperiletkenlerin uygulama alanları.....	48
4.3.3 Süperiletken kablolar .....	49
4.3.4 Arıza akım sınırlandırma (FCL).....	49
4.3.5 Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES) .....	49
4.3.6 Süperiletken generatörler.....	50
4.3.7 Süperiletken transformatörler .....	51
4.3.8 Diğer uygulamalar .....	52
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>54</b>
5.1 Elektrik Üretim Sistemlerinde Senkronizasyon Sonuç ve Öneriler .....	54
5.2 Süperiletken Malzemelerin Kullanım Avantajları ve Sonuçlar .....	55
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>57</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>59</b>

Ek-A: Senkronizasyon Rölesi Terminal Bağlantı Planı .....	59
Ek-B: Senkronizasyon Rölesi Ayar Aralıkları .....	60
Ek-C: Bir Santralde Generatör Devreye Alma Senaryoları .....	61
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



## KISALTMALAR

<b>AOS</b>	: Ayrık Olay Sistem Yaklaşımı
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Denetleme Kurumu
<b>EÜAŞ</b>	: Elektrik Üretim A.Ş.
<b>GCB</b>	: Generatör Devre Kesici
<b>GT</b>	: Gerilim Trafosu
<b>HTS</b>	:Yüksek Sıcaklık Süperiletken
<b>PLC</b>	: Programmable Logic Controler
<b>SCADA</b>	: Supervisory Control and Data Acquisition
<b>St</b>	: Station
<b>TEDAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
<b>YSS</b>	: Yüksek Sıcaklık Süperiletken

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b>Sayfa No.</b>
Çizelge 1.1: 2023 Aralık-2024 Aralık Ayları Arası Elektrik Kurulu Gücü ve Üretim Miktarı.....	2
Çizelge 4.1: Santral Türlerinin Verim ve Kapasite Faktörü Karşılaştırması .....	42
Çizelge 4.2: Bazı Süperiletken Element / Bileşikler ve Kritik Sıcaklıkları .....	46
Çizelge 4.3: 1. Tip Süperiletkenlerin Kritik Sıcaklık ve Kritik Manyetik Alan Değerleri .....	47
Çizelge 4.4: 2. Tip Süper İletkenlerin Kritik Sıcaklık ve Kritik Manyetik Alan Değerleri .....	48
Çizelge B.1: Senkronizasyon Rölesi Ayar Aralıkları ve Standart Değerleri .....	60

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1.1: 2024 Yılı Aralık Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı (%).....	3
Şekil 1.2: Aralık 2024 Döneminde Lisanslı Elektrik Üretiminde ilk 10 Şirketin Payları (%) .....	3
Şekil 1.3: Enerji Kaynaklarına Göre 2030 ve 2035 Yılları İçin Kurulu Güç Tahmini (GW) .....	4
Şekil 1.4: Kaynaklara Göre 2030 ve 2035 Yılları İçin Enerji Üretim Tahmini (TWh) .....	5
Şekil 2.1: Senkron Makine Yapısı .....	7
Şekil 2.2: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi .....	8
Şekil 2.3: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Endüktif Yükte Fazör Diagramı ( $0 < \phi < 90$ ) .....	9
Şekil 2.4: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Omik Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı .....	10
Şekil 2.5: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Kapasitif Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı .....	10
Şekil 2.6: Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Endüktif Yük Hali İçin Fazör Diagramı .....	11
Şekil 2.7: Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Omik Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı .....	12
Şekil 2.8: Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Kapasitif Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı .....	12
Şekil 2.9: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Endüktif Yüklenmesindeki Vektör Diagramı .....	13
Şekil 2.10: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün $M_d = f(\beta)$ Karakteristiği .....	13
Şekil 2.11: Senkron Generatörde Reaktif Güç Ayarı .....	15
Şekil 3.1: Sönen Lamba Montaj Devresi .....	18
Şekil 3.2: Yanan Lamba Montaj Devresi .....	18

Şekil 3.3: Dönen Işık Montaj Devresi Bağlantı Şeması .....	19
Şekil 3.4: Çift Voltmetre, Çift Frekansmetre ve Senkronoskop .....	19
Şekil 3.5: Üç Fazlı Otomatik Senkronizasyon Cihazı (Rölesi).....	20
Şekil 3.6: Elektrik Üretim Santralı Prensip Bağlantı Şeması .....	21
Şekil 3.7: Elektrik Üretim Santralı Tek Hat Şeması .....	23
Şekil 3.8: Sistem Devreye Alma Senaryo Şeması Örneği .....	25
Şekil 3.9: Örnek Ünite Senkronizasyonu için Lojik Kapı Diyagramı .....	30
Şekil 3.10: Senkronizasyon Panosu Ön Görünümü .....	32
Şekil 3.11: Çift Voltmetre, Çift Frekansmetre ve Senkronoskop Bağlantı Şeması ..	33
Şekil 3.12: Senkronizasyon Rölesi Bağlantı Şeması .....	34
Şekil 4.1: Buhar Türbin Santralında Rankine Çevrimi .....	43
Şekil 4.2: Gaz Türbin Santralında Brayton Çevrimi .....	43
Şekil 4.3: Civa (Hg) Elementinin Sıcaklık-Direnç Değişim Grafiği .....	45
Şekil 4.4: Süperiletken Malzemenin R-T grafiği .....	46
Şekil 4.5: Süper İletkenlerin Faz Diagramları (a) I. Tip; (b) II. Tip Süperiletkenler	48
Şekil 4.6: YSS Kaplamalı Bir İletkenin Yapısı .....	50
Şekil 4.7: Süperiletken Senkron Makinenin Eksenel Kesiti .....	51
Şekil 4.8: Çeşitli Rüzgar Türbin Tasarımlarının Karşılaştırması .....	51
Şekil A.1: Senkronizasyon Rölesi Slot Planı .....	59

# ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SENKRONİZASYON VE SİSTEM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

## ÖZET

Son yıllarda dünyamızdaki çok yönlü teknolojik gelişmelerin ivmesinin artışı ile birlikte, elektrik enerjisine olan ihtiyacın da arttığı gözlenmektedir. Bu ihtiyacın giderilmesine yönelik çalışmalar son hızla sürmektedir. Sanayi tesislerinin ve hızlı nüfus artışı ile birlikte kentleşmenin de hızla artması elektrik enerjisine olan ihtiyacı da artırdığı aşikardır.

Elektrik enerjisinin üretilmesi için çok yönlü çalışmalar yapılmakla birlikte üretilen elektrik enerjisinin kalitesinin ve sürekliliğinin de karşılanması gerekmektedir. Ürünlerin kesintisiz olarak tesislerde üretilebilmesi için elektrik enerji üretim ve dağıtım sistemlerinin de koruma ve kontrol ekipmanları ile donatılma zarureti doğmuştur. Elektrik enerjisi üretim ve dağıtım şebekesinden talep edilen gücü, kesintisiz şekilde tüketicilere sağlaması kritik bir durum olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Elektrik üretim tesisleri (Santraller) genel olarak şebeke üzerinden birbirleriyle paralel çalışmaktadır. Şebekenin talep ettiği gücü karşılamak üzere büyük güçlü santraller devrede iken puant gücü karşılamak üzere kurulan daha düşük güç kapasiteli santraller de sistem içinde bulunmaktadır. Bununla birlikte bazı sanayi kuruluşları kendi ihtiyacı olan elektrik enerjisini kendisi üretmekte ve üretmiş olduğu fazla elektrik enerjisini şebeke üzerinden sisteme satmaktadır.

Elektrik üretim tesislerinde üretilen enerji genel olarak birden fazla Generatörün ana baraya veya transfer baraya paralel bağlanması suretiyle iletilmektedir. Generatörlerin paralel olarak bağlanması kapasite problemini ortadan kaldırmakta ve sistemde oluşması muhtemel hata oranını önemli ölçüde tolera etmektedir. Sürekliliğin sağlanması ve talep edilen daha fazla gücün tüketim bölgesine transfer edilmesi, sistemin işletme kolaylığı bakımından da ayrıca tüketicilere avantaj sağlamaktadır.

Alternatif akım (AC) kaynağı olarak her bir Senkron Generatörün baraya paralel olarak bağlanmadan önce statorundan üretilen elektriğin karakteristik değerleri (faz yönü, genlik ve frekansı) birbirlerinden doğal olarak farklıdır. En az 2 Generatörün paralel olarak bağlanabilmesi, yani senkron olabilmesi için bu değerlerin eşit ya da çok yakın değerlere sahip olması istenir. Aksi durumda devre üzerindeki ekipmanların zarar görmesi kaçınılmaz bir durum oluşturur.

Generatörlerin birbirleri ile ya da şebekeyle senkron olabilmesi için bazı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden en eski ve basit olanı senkron lambalarıdır. Bu yöntemdeki mantık senkronlama yapılacak iki sistem arasındaki faz değerleri arasındaki fark çok fazla ise lambalar parlak yanar. Değerler birbirlerine yaklaştıkça parlaklığı azalır ve değerlerin çok yakın veya eşit olması durumunda tamamen söner. Her faza ait üç lamba da birlikte parlaklaşır ve birlikte sönerse faz sıraları ve frekansları aynı ve genlikleri de eşit demektir.

Diğer bir yöntem ise, kaynaklardan gelen işaretleri gösteren çift voltmetre, çift frekansmetre ve senkron operasyonunu yapan senkronoskopdur. Her iki sistemin senkron olup olmadığının belirlenmesi ve kontrolünün sağlanması sayısal kontrol ve koruma röleleri (Syncron-check relay) vasıtasıyla gerçekleştirilir.

Bu çalışmada ölü baranın (dead-bus) enerjilendirmesi, canlı bara üzerinden iki ve daha fazla Generatörün otomatik senkron rölesi ile senkronlama işleminin aşamaları anlatılacaktır.

Ayrıca bu çalışmanın son bölümünde ise Elektrik Üretim tesislerinde verimliliğin artırılması konusunda bilgiler sunulacaktır. Bu başlığın altında, son yılların önemli araştırma konularından biri olan süperiletkenlik konusu da işlenecektir.

**Anahtar Kelimeler:** *Generatör, Senkronizasyon, paralel çalışma, süperiletkenlik*



## **SYNCHRONIZATION IN ELECTRICITY GENERATION SYSTEMS AND IMPROVEMENT OF SYSTEM EFFICIENCY**

### **ABSTRACT**

In recent years, with the acceleration of technological developments in our world, the need for electrical energy has increased greatly. Studies to meet this need continue at full speed. The rapid increase in the number of industrial establishments increases the need for electrical energy. While multi-faceted studies are carried out to produce electrical energy, the quality and continuity of the electrical energy produced must also be met. In order for products to be produced in facilities without interruption, it has become necessary for electrical energy production and distribution systems to be equipped with protection and control equipment. The Electricity Production and distribution network must meet the demanded power and ensure uninterrupted energy flow.

Power Plants generally operate in parallel with each other over the network. While large-power power plants are in operation to meet the power demanded by the network, smaller-capacity power plants established to meet peak power are also present in the system. Some industrial establishments even produce their own electrical energy and sell the excess electricity they produce to the system via the grid.

The energy produced in electricity production facilities is generally transferred by connecting more than one generator in parallel to the main busbar or transfer busbar. Connecting generators in parallel eliminates the capacity problem and the system tolerates the possible error rate to a great extent. Ensuring continuity and transferring more power requested to the consumption area also provides advantages to consumers in terms of ease of operation of the system.

The characteristic values (phase direction, phase amplitude and frequency) of the electricity produced from the stator of each synchronous generator as an alternating current (AC) source before being connected in parallel to the busbar are naturally different from each other. In order for at least 2 generators to be connected in parallel, i.e. to be synchronous, it is desired that these values have equal or very close values. Otherwise, damage to the equipment on the circuit is an inevitable situation.

There are some methods for generators to be synchronous with each other. The oldest and simplest of these methods is synchronous lamps. The logic in this method is that if the difference between the phase values between the two systems to be synchronized is too much, the lamps will light up brightly. As the values approach each other, their brightness decreases and if the values are too close or equal, they will go out completely. If all three lamps belonging to each phase brighten and go out together, it means that the phase sequences and frequencies are the same and their amplitudes are equal.

Another method is a double voltmeter, double frequency meter, and a synchronoscope that performs the synchronous operation, which shows the signals

coming from the sources. Determining whether both systems are synchronous and ensuring control is carried out by means of digital control and protection relays (Synchron-check relay).

In this study, the dead bus will be energized and the synchronization process will be carried out with the automatic synchronous relay of two or more generatörs over the live bus.

In addition, information will be provided in the last section of this study on increasing efficiency in Electricity Production facilities. Under this heading, the subject of superconductivity, one of the important research topics of recent years, will also be discussed.

**Keywords:** *Generatör, Synchronization, parallel operation, superconductivity*



## 1. GİRİŞ

Ülkemizde artan elektrik enerjisi ihtiyacına ilişkin EPDK ve TEİAŞ bünyesinde hazırlanan 2023 yılı genel istatistiksel bilgiler ışığında değerlendirmeler yapılmaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan rapordan 5 yıllık ve 10 yıllık kurulu güç ve enerji üretim tahminine ilişkin bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, Türkiye’de enterkonnekte şebeke yapısı ile ilgili bilgiler de sunulacaktır. Elektrik üretiminde büyük çoğunlukla Senkron Generatörler kullanılmaktadır. Bu nedenle Senkron Generatörlerin yapısı ve eşdeğer devresi hakkında temel bilgiler verilecektir.

Generatörlerin Şebekeye paralel bağlanması diğer bir deyişle Generatörlerin senkronlanması konusuna örnek olarak inşai ve devreye alma sürecinde bulunduğum Afganistan’ın Faizabad Şehrindeki Hidroelektrik Santralindeki çalışmalara ilişkin tecrübeler de bu tez çalışmasında paylaşılacaktır. Güç santralinde 3 adet senkron Generatörün ve 1 adet peak power diesel Generatörün şebekeye senkronizasyonu konusuna ilişkin detaylar işlenecektir.

Son bölümde ise, elektrik üretim tesislerinde (elektrik santrallerinde), enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir. Konu dahilinde son yıllarda üzerinde yoğunlaşılacak konularından biri olan superiletkenlik konusuna da değinilecektir.

### 1.1 2024 Yılı itibariyle Türkiye’nin Elektrik Sektör Raporu

Dünyadaki mevcut duruma paralel olarak Türkiye’de elektrik enerjisine olan talep hızla artmaktadır. Talebin yükselmesiyle birlikte elektrik enerjisi üretim çeşitliliğinin ve üretim tesislerinin sayısının artması da kaçınılmaz olmaktadır. Ülkemizde elektrik piyasasını düzenleyen kurum olarak Enerji Piyasası Kurumu (EPKD) düzenli olarak konuya ilişkin istatistikler yayınlamaktadır. 2024 yılı aralık ayı sonu itibariyle Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu gücü 2023 yılı Aralık ayı sonuna göre %4.68 artarak 115.975,09 MW olarak gerçekleşmiştir. Üretilen toplam enerji MWh olarak %6,33 artarak 347.213.245,98 MWh a ulaşmıştır.

2023 Aralık ayı ile 2024 aralık ayı arasında gerçekleşen elektrik üretimine ilişkin ölçülen değerler tablosu Çizelge 1.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 1.1: 2023 Aralık-2024 Aralık Ayları Arası Elektrik Kurulu Gücü ve Üretim Miktarı [1]**

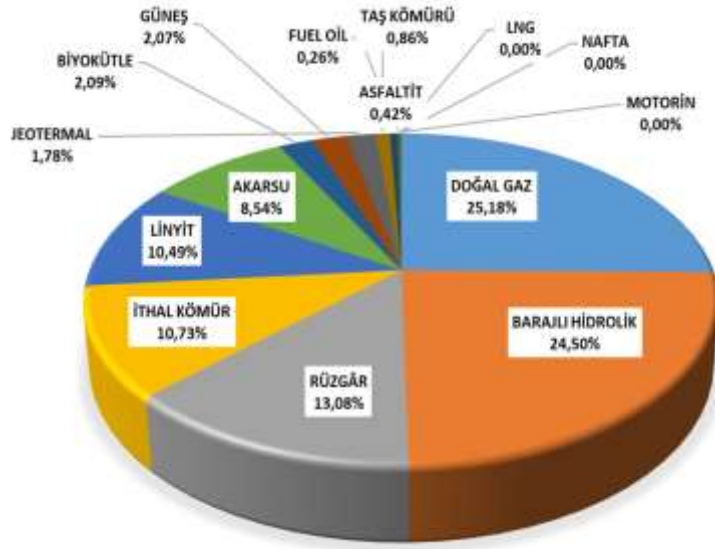
KAYNAK TÜRÜ	TOPLAM KURULU GÜÇ* (MW)				TOPLAM ÜRETİM* (MWh)			
	2023 ARALIK	ORAN (%)	2024 ARALIK	ORAN (%)	2023 OCAK-ARALIK	ORAN (%)	2024 OCAK-ARALIK	ORAN (%)
HİDROLİK	31.962,44	28,85	32.202,96	27,77	63.998.629,09	19,60	74.881.584,54	21,57
RÜZGÂR	11.806,07	10,66	12.864,13	11,09	34.039.828,06	10,43	36.628.890,93	10,55
GÜNEŞ	15.592,50	14,08	19.873,39	17,14	18.832.243,89	5,77	25.894.532,98	7,46
BİYOKÜTLE	2.077,29	1,88	2.130,53	1,84	9.901.826,21	3,03	10.162.564,63	2,93
JEOTERMAL	1.653,43	1,49	1.733,51	1,49	11.102.075,59	3,40	11.241.524,17	3,24
YENİLENEBİLİR	63.091,72	56,95	68.804,51	59,33	137.874.602,84	42,23	158.809.097,26	45,74
DOĞAL GAZ	25.616,43	23,12	24.980,17	21,54	68.376.769,69	20,94	64.927.630,10	18,70
İTHAL KÖMÜR	10.373,80	9,36	10.455,80	9,02	72.719.397,46	22,27	75.408.273,96	21,72
LİNYİT	10.193,96	9,20	10.229,19	8,82	41.735.305,12	12,78	42.055.091,73	12,11
TAŞ KÖMÜRÜ	840,77	0,76	840,77	0,72	3.752.683,29	1,15	4.131.661,87	1,19
ASFALTİT	405,00	0,37	405,00	0,35	1.589.002,66	0,49	1.153.809,11	0,33
FUEL OİL	251,93	0,23	251,93	0,22	464.870,85	0,14	727.681,96	0,21
NAFTA	4,74	0,00	4,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LNG	1,95	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	1,04	0,00	2.056,37	0,00	0,00	0,00
TERMİK	47.689,62	43,05	47.170,58	40,67	188.640.085,43	57,77	188.404.148,72	54,26
TOPLAM	110.781,34	100,00	115.975,09	100,00	326.514.688,27	100,00	347.213.245,98	100,00

## 1.2 Kaynaklarına Göre Elektrik Üretim Kapasitesi

Kaynaklarına göre 2024 yılı sonu itibariyle enerji üretimi Şekil 1.1 de sunulmaktadır. Grafikteki güneşten elde edilen oranın yukarıda tabloda yazılan miktara göre düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni grafikteki değer yalnız lisanslı tesis kurulu güç değeridir.

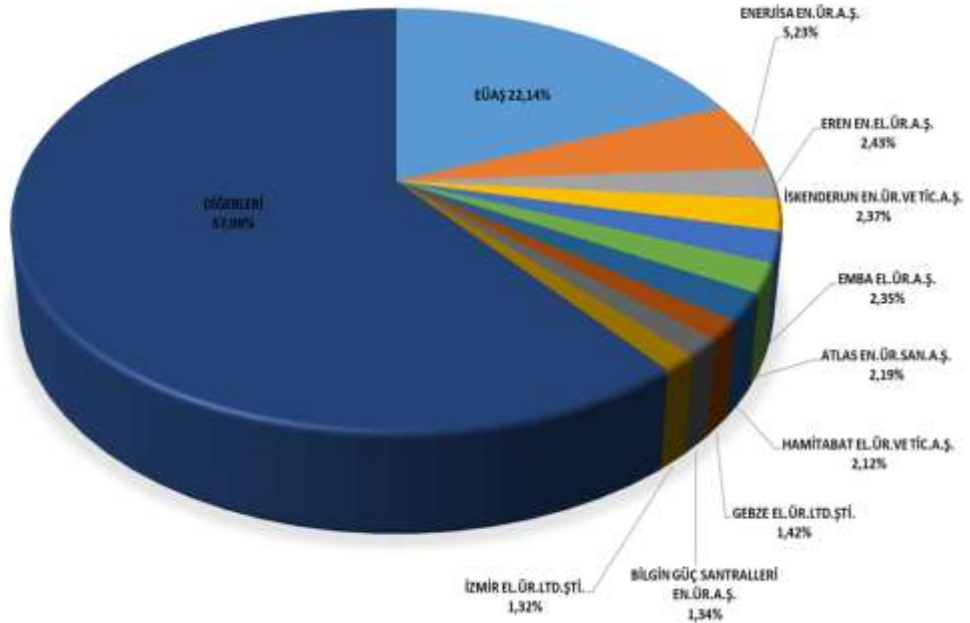
Lisanslı sistemler, 5 MW ve üzeri kapasiteye sahip büyük ölçekli üretim tesisleri olup, tesislerde üretilen elektrik, doğrudan şebekeye satılabilir ve piyasa koşullarına göre gelir elde edilebilir.

Lisanssız sistemler ise, 5 MW'ın altında kapasiteye sahiptir. Kendi elektrik tüketimini karşılamak isteyen bireyler veya işletmeler tarafından tercih edilir. Tesiste üretilen elektrik, öncelikle kendi tüketimini karşılar; üretimin fazla olması halinde bazı şartlar altında şebekeye satılabilir.



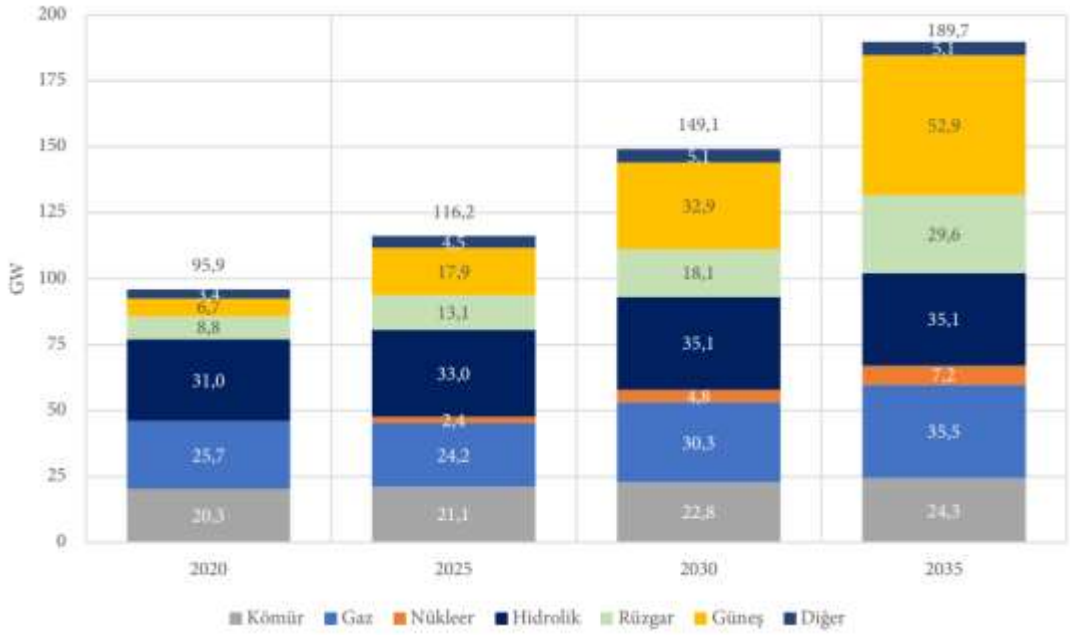
**Şekil 1.1: 2024 Yılı Aralık Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı (%) [1]**

Türkiye’de Elektrik üretimi kamu ve özel girişimci kişi ve kuruluşlar tarafından üretilerek enterkonnekte sisteme verilir. Kamunun elinde bulunan Elektrik santrallerinin özellikle 2000 yılından sonra özelleştirilmesi nedeniyle işletmesi özel sektör marifetiyle yapılmaktadır. Bununla birlikte özel girişimciler tarafından lisanslı ve lisanssız olarak projelendirilmesi yapılarak inşa faaliyeti tamamlanan santraller de mevcuttur. Elektrik tesislerinin üretim payları aşağıdaki grafikte verilmiştir.



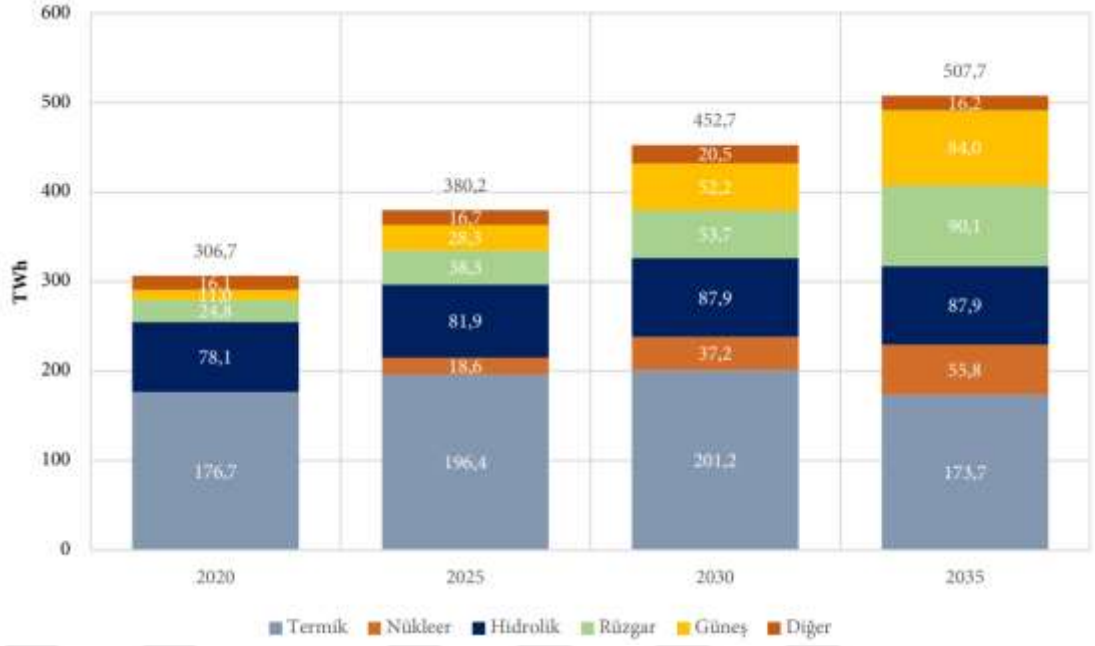
**Şekil 1.2: Aralık 2024 Döneminde Lisanslı Elektrik Üretiminde ilk 10 Şirketin Payları (%) [1]**

2022 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Ulusal Enerji Planı Raporu yayınlanmıştır. Yayınlanan bu rapora göre Türkiye'nin 2020 yılında 95,9 GW olan elektrik kurulu gücü 2035 yılında 189,7 GW'a yükselmesi planlanmaktadır. Şekil 1.3 de görüldüğü üzere 2020 yılında kurulu güç içinde %52,0 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2035 yılına kadar %64,7'ye ulaşabileceği öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji sınıfında yer alan hidroelektrik santraller, orta-uzun dönemde 35,1 GW kurulu güç değerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi kurulu gücü 29,6 GW'a ulaşmakta olup, güneş enerjisi kurulu gücü ise 52,9 GW'a yükselmektedir. Türkiye'de elektrik enerjisi üretimi yapan bir nükleer santral mevcut olmamakla birlikte Mersin Akkuyu'da nükleer güç santrali inşaatı devam etmektedir. Akkuyu nükleer güç santralının ilk reaktörünün 2025 yılı sonu itibariyle tamamlanıp üretime geçeceği öngörülmektedir.



**Şekil 1.3: Enerji Kaynaklarına Göre 2030 ve 2035 Yılları İçin Kurulu Güç Tahmini (GW) [2]**

Kurulu güç artışı ile birlikte, toplam enerji üretimi 2030 yılında 452.7 TWh yükselmektedir. Aşağıdaki grafikten de görüleceği üzere termik santral yatırımlarının azalacağı, 2035 yılı sonunda 173,7 TWh e düşeceği öngörülmüştür. Buna ilave olarak 2020 yılında rüzgar ve güneş enerjisinden üretilen elektriğin payı %11,7 iken, 2035 yılında %54.8 e yükseleceği tahmin edilmektedir.



**Şekil 1.4: Kaynaklara Göre 2030 ve 2035 Yılları İçin Enerji Üretim Tahmini (TWh) [2]**

### 1.3 Tezin Amacı

TEİAŞ tarafından yayınlanan verilere göre Temmuz-2024 tarihi itibarıyla ülkemizde şu an faaliyette bulunan elektrik santrali sayısı 10.027 adettir. Bunlardan 62 adedi EÜAŞ kapsamında faaliyet gösterirken 92 adet işletme hakkı devredilen santraller ve 1.637 adet ise serbest üretim şirketlerine ait olan santrallerdir. Kalan 8.236 adet ise lisanssız elektrik üretim santralleridir [2]. Bu santrallerde üretilen elektriğin şalt sahaları üzerinden Türkiye enterkonekte şebekeye bağlanabilmesi için mevcut enterkonekte sisteme senkron olması gerekmektedir. Bu çalışmada generatörlerin şebekeye entegre olabilmesi için senkronizasyon şartları açıklanacaktır.

Bununla birlikte enerji üretiminde bulunan santrallerde verimliliğin artırılması için yapılan çalışmalar işlenecektir.

Ayrıca, elektrik santrallerindeki verimliliğin artırılması için süperiletkenlik konusu işlenecektir. Bu kapsamda dünyada kullanımda olan süperiletken malzemeden imal edilmiş olan generatörlerden örnekler verilecektir.

#### 1.4 Literatür Araştırması

Generatörlerin senkronizasyonu konusunda literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar gerilimin genliği, frekansı ve faz açısı ve dönüş yönü konularına değinmişlerdir. Sözkonusu bu parametrelerin ölçüm ve kontrolü için mikrodnetleyiciler tasarlanmış ve bu mikrodnetleyiciler ile otomatik senkronizasyonun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Evans 1990 yılında buhar türbini için bir senkronizasyon kontrol rölesi ve bir mikrodnetleyeci ile manuel/otomatik senkronizasyon sistemi tasarlamıştır [4]. 1991'de Malik, Hope, Hancock, Zhaohui, Luqing, Shouping bir su türbininin frekansını sayısal karşılaştırıcılar ve frekans bölücüler ile ölçerek, generatörün dönüş hızını, başka bir ifade ile frekansını mikrodnetleyiciler ile kontrol etmişlerdir [5]. Gorecki, Szmajda ve Mroczka enerji kalitesinin ölçümü ile ilgili çalışmasında DSP tabanlı adaptif ölçüm ve senkronizasyon sistemini tasarlamışlardır [6]. Guoqiang ve Renmu 2004'te generatörlerin paralel çalışması için dengeleme komutları oluşturan, DSP tabanlı bulanık senkronizasyon kontrolörü çalışması yapmışlardır [7]. Bekiroğlu ve Bayrak PIC serisi mikrodnetleyici vasıtasıyla faz, frekans ve gerilim genlik ölçümü yaparak, bir otomatik senkronizasyon kontrolörü tasarlamışlardır [8]. 2009 yılında Zhang, Dang, Jiang ve Chai frekans, gerilimin genliği gibi elektriksel karakteristiklerin PIC mikrodnetleyici ile ölçüldüğü, dengeleme komutlarının ise FPGA ile sağlandığı otomatik senkronizasyon cihazı üzerinde çalışmışlardır [9]. Seeley ve Cameron 2012 de, Generatör kontrolü ve otomatik senkronizasyonda gelişmeler ile bağımsız senkronizasyon sistemlerine olan ihtiyaca ilişkin konuları ele almıştır [10]. Kavak, 2005 yılındaki makalesinde dünyada ve Türkiye'de enerji verimliliği ve türk sanayiinde enerji verimliliğinin incelenmesi konusunu ele almıştır [24]. Terzioğlu ve Fedai 2013 yılında, Enerji verimliliği ve super iletken malzemeler üzerine çalışma yapmıştır [28]. 2022 de Aksoy hazırlamış olduğu tezinde, seramik süperiletkenlerin yapısal ve süperiletkenlik özellikleri üzerine Sb-AG birlikte katkılanmasının etkisi konusunu incelemiştir [30]. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu yıllık raporunda 2024 yılı için elektrik piyasası sektör raporunu yayınlamıştır [1]. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 2024 yılında Enerji üretim ve iletim ile ilgili yıllık değerlendirme raporu yayınlamıştır [2]. 2022 yılı itibariyle T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye enerji planı raporunu yayınlamıştır [3].

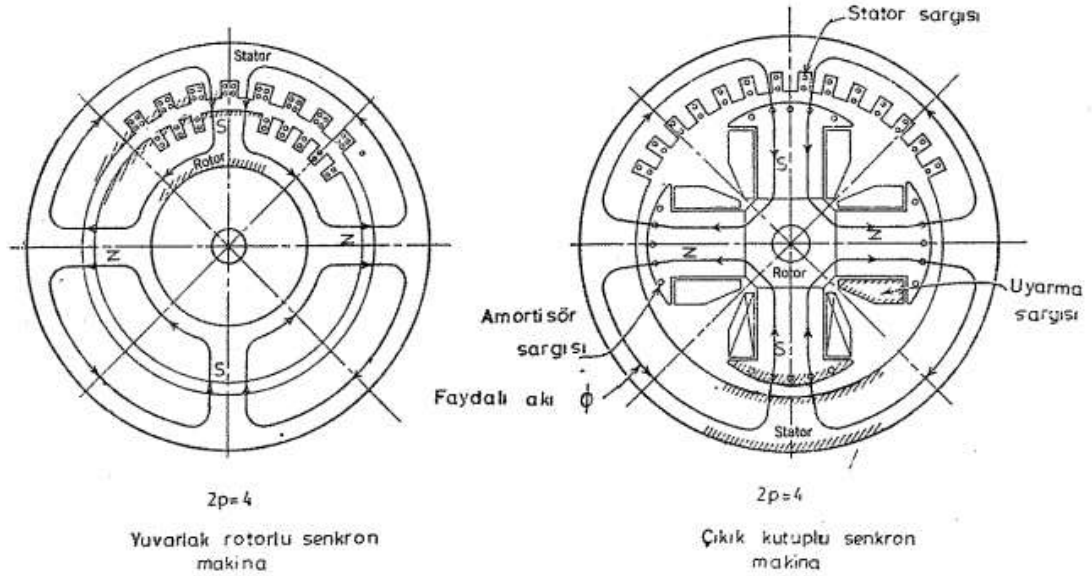
## 2. SENKRON GENERATÖRLER

### 2.1 Genel Bilgiler

Senkron makineler elektromıknatıslı bir rotor ile 1 veya 3 fazlı AC sargısı bulunan statorlardan oluşur. Eğer makinenin gücü düşük ise rotorunda elektromıknatıs yerine sabit mıknatıs kullanılabilir. Bu makinelerde devir sayısı sabittir. İlk olarak bu makineler 1885 de Nollet ve Van Malderen tarafından generatör olarak yapılmıştır. Bu gün itibariyle güçleri 2.000 MVA ya kadar olanları üretilmektedir. Gerilim kademeleri genel olarak 6, 11, 15, 17,5, 20, 27 kV olarak üretilebilmektedir.

### 2.2 Senkron Generatörlerin Yapısı

Senkron Generatörler rotor yapılarına göre yuvarlak rotorlu ve çıkık kutuplu olarak yapılırlar. Yuvarlak kutuplu olanlara turbogeneratörler de denir. Bunların senkron hızları



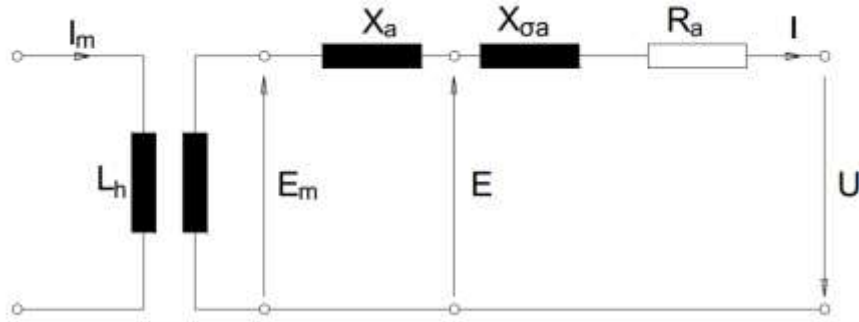
Şekil 2.1: Senkron Makine Yapısı [26]

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (2.1)$$

Burada n senkron devir sayısı, f frekans ve p çift kutup sayısıdır. Kutup sayıları 2, 4 ya da 6 olarak yapılabilir ve senkron hızları yüksektir. Bunların rotor çapları küçük buna mukabil rotor uzunlukları büyüktür. Çıkık kutuplu senkron generatörlerde ise kutup sayısı çok fazladır. 72 kutuplu olanına kadar yapılabilir. Gücü ise 2000 MVA ya kadar olanı imâl edilebilmektedir.

### 2.3 Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi

Üç fazlı senkron makinelerde eşdeğer devre bir faz için çizilir. Stator sargısı yıldız bağlıdır. Bir faza ait stator sargı direnci  $R_a$ , sargının esas endüktansı  $L_h$ , sargının kaçak endüktansı  $X_{\sigma a}$ , endüvi reaksiyonu reaktansı ise  $X_a$  ile ifade edildiğinde yuvarlak rotorlu senkron generatörün eşdeğer devresi şekil.2.2 deki gibidir.



Şekil 2.2: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi [26]

$$X_{\sigma a} + X_a = X_d = X_s \quad (2.2)$$

Yuvarlak rotorlu senkron generatörün makine motor kuvveti ve gerilim fazör diagramlarını çizmek için  $U$ ,  $I$ ,  $\phi$ ,  $R_a$ ,  $X_a$ ,  $X_{\sigma a}$  büyüklükleri ve  $E = f(I_m)$  boştaki karakteristiği biliniyorsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$E = E_m + E_a = U + IR_a + jIX_{\sigma a} + jIX_a \quad (2.3)$$

$$E = U + I(R_a + jX_{\sigma a} + jX_a) \text{ dir.} \quad (2.4)$$

Bu bağıntıdan ve yukarıdaki büyüklüklerden hareket edilerek senkron generatörün fazör diyagramı elde edilir. Şekil 2.3 de verilen fazör diagramında gerilim düşümü ise;

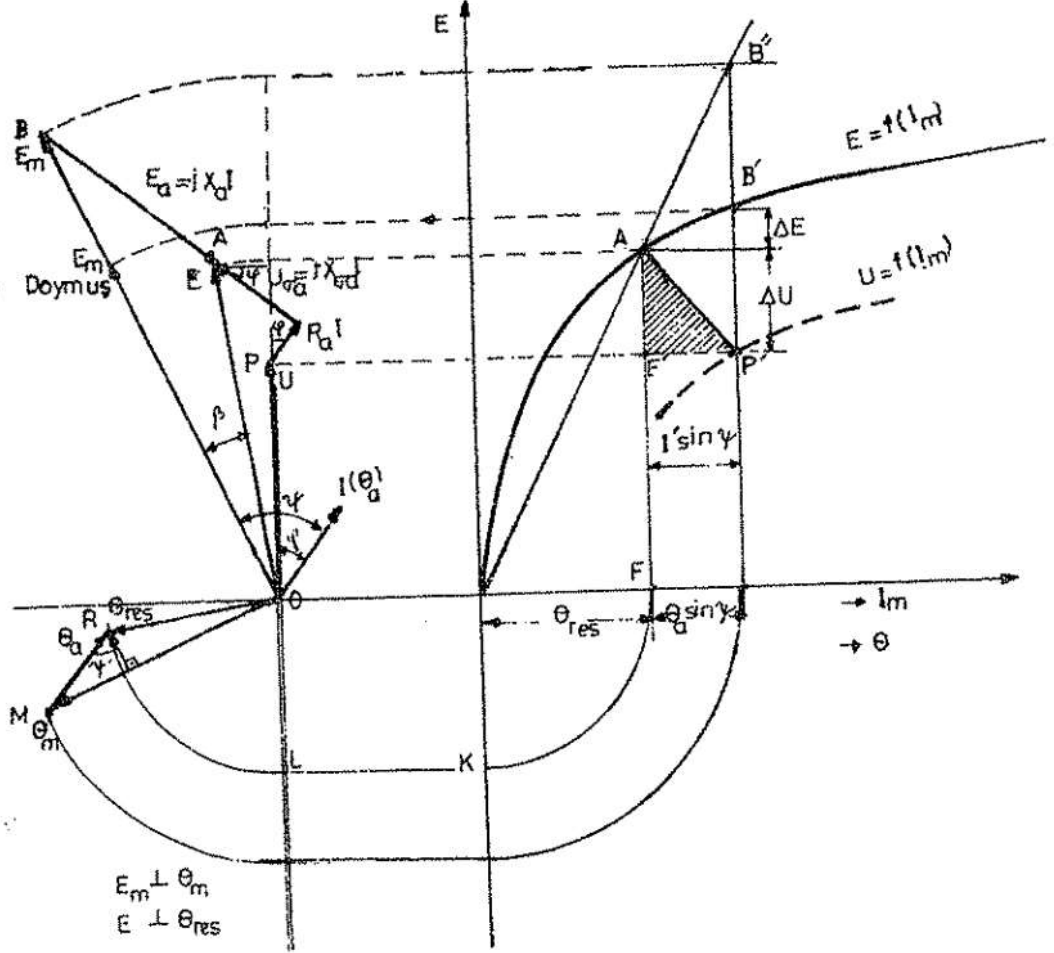
$$\Delta U = U_{\sigma a} \cdot \sin\phi + U_{R_a} \cos\phi \quad (2.5)$$

Saf endüktif yükte  $\phi = 90^\circ$  dir.

Bu durumda  $\cos\phi=0$  ve

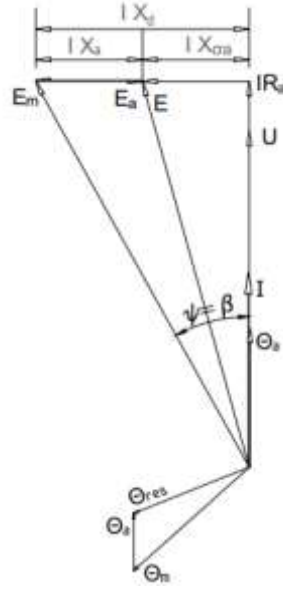
$$\Delta U = U_{ca} \cdot \sin\phi \text{ dir.} \quad (2.6)$$

A noktası boşa çalışma noktasıdır.

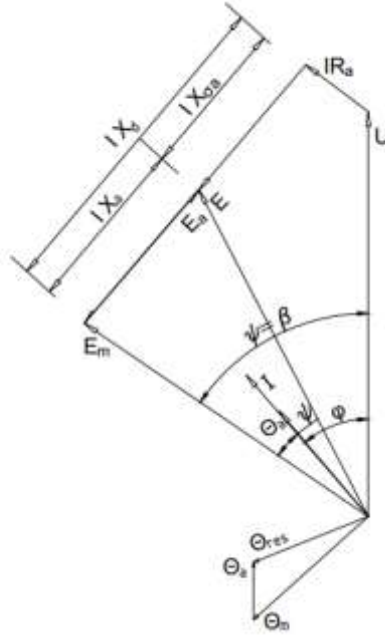


**Şekil 2.3: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Endüktif Yükte Fazör Diagramı ( $0 < \phi < 90$ ) [26]**

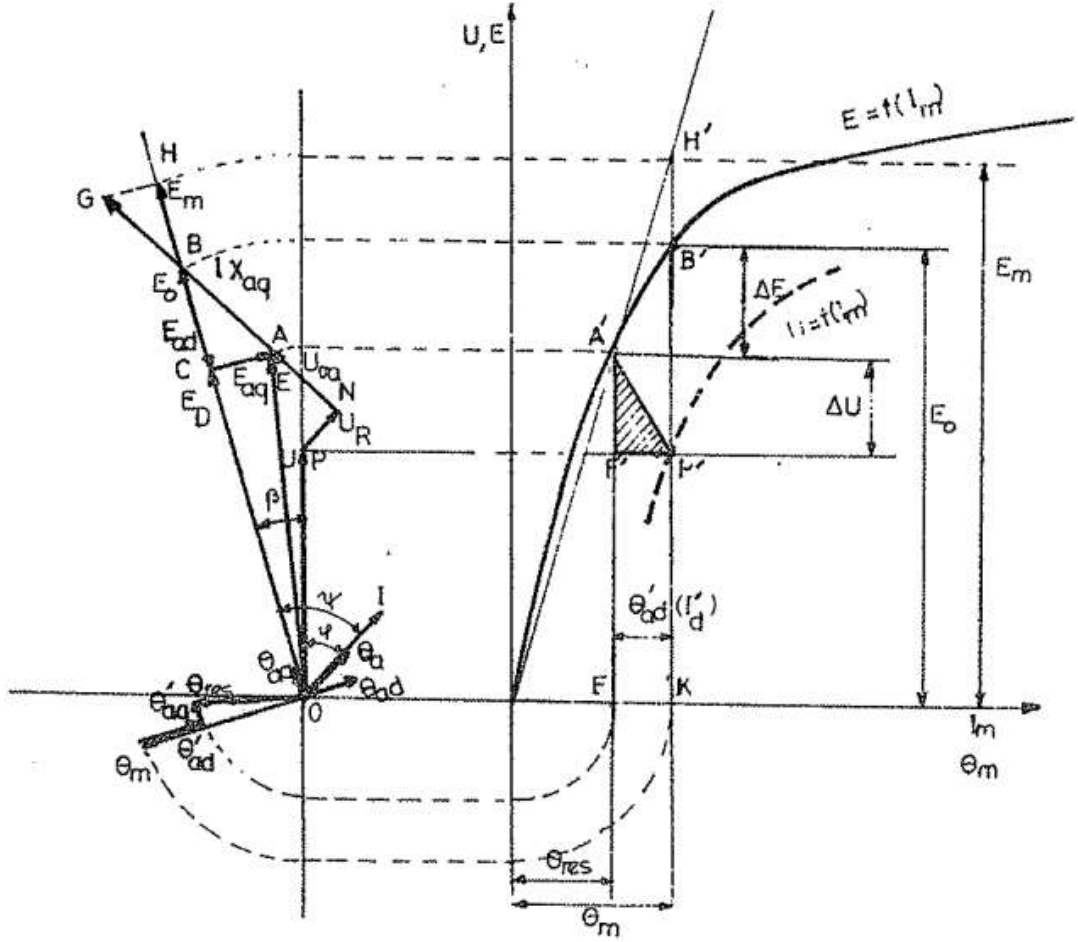
Yuvarlak rotorlu senkron generatörün doymanın ihmal edilmesi halinde ve omik yüklenmesi durumunda fazör diagramı şekil 2.4'de, kapasitif yüklenmesi halinde şekil 2.5'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.4: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Omik Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı [26]**



**Şekil 2.5: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Kapasitif Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı [26]**

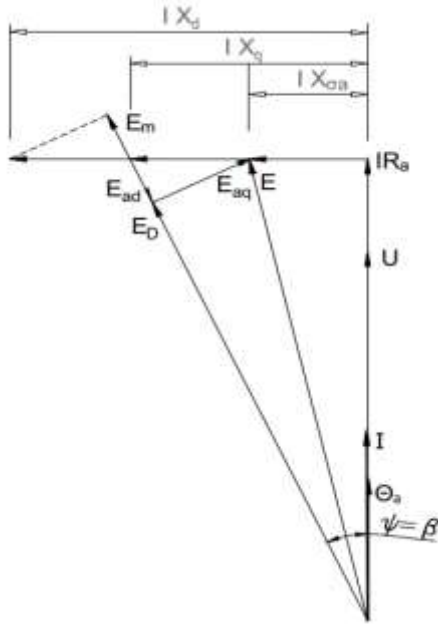


**Şekil 2.6: Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Endüktif Yük Hali İçin Fazör Diagramı [26]**

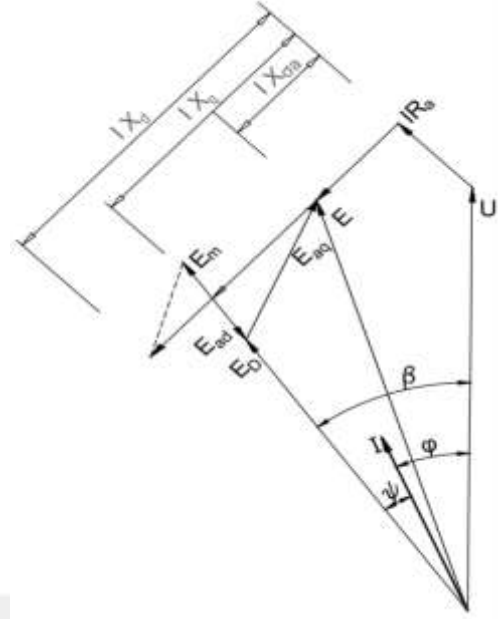
Aynı şekilde çıkık kutuplu bir senkron generatörün omik ve kapasitif yük altındaki fazör diagramları sırası ile 2.7 ve şekil 2.8’de gösterildiği gibidir. Burada  $X_d$ : Boyuna senkron reaktans,  $X_q$  ise enine senkron reaktanstır.

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma a} \quad (2.7)$$

$$X_q = X_{aq} + X_{\sigma a} \quad (2.8)$$



**Şekil 2.7: Çıkık Kutuplu Senkron Generatrün Omik Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı [26]**



**Şekil 2.8: Çıkık Kutuplu Senkron Generatrün Kapasitif Yüklenmesi Durumundaki Fazör Diagramı [26]**

#### 2.4 Senkron Generatründe Elektriksel Güç ve Döndürme Momenti

Şekil 2.9 da görüldüğü gibi  $R=0$  olacak şekilde endüvinin faz sargısı ihmal edildiğinde  $m$  fazlı yuvarlak rotorlu senkron generatrünün vektör diagramı ele alınırsa;

$$I \cdot \cos\psi = U \cdot \sin\beta / X_d \text{ bağıntısı ile} \quad (2.9)$$

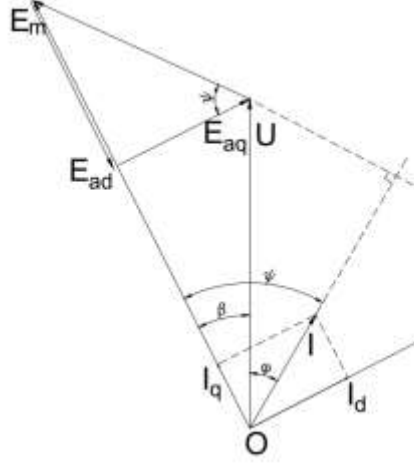
$$P_d = m \cdot E_m \cdot I \cdot \cos\psi \quad (2.10)$$

$$M_d = P_d \cdot 60 / 2\pi \cdot n_s \text{ dir.} \quad (2.11)$$

Yerine koyarsak;

$$M_d = (60/2\pi) \cdot (m \cdot E_m / n_s) \cdot (U \cdot \sin\beta / X_d) \quad (2.12)$$

şeklindedir.



**Şekil 2.9: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün Endüktif Yüklenmesindeki Vektör Diagramı [26]**

$R_a$  nın ihmal edilmemesi durumunda ve kısa devre akımı

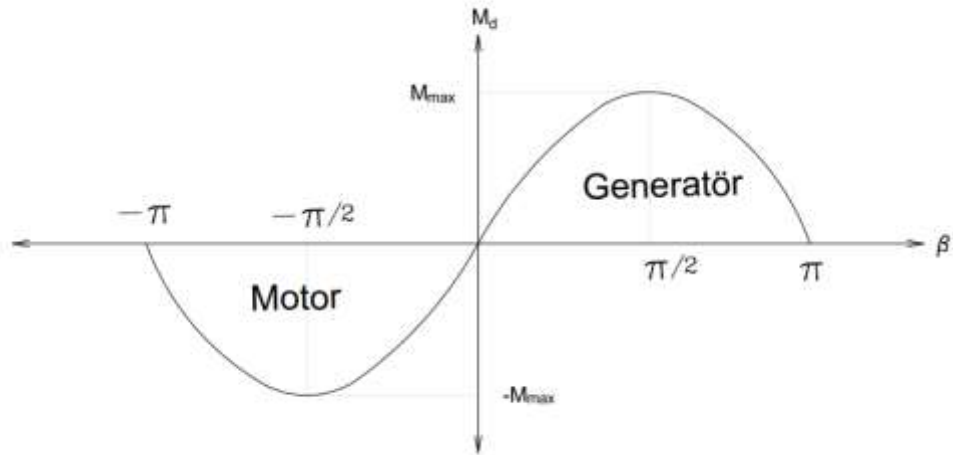
$$I_k = E_m / X_d \quad \text{ve} \quad (2.13)$$

$$\text{tg} \rho = R_a / X_d \quad \text{ise} \quad (2.14)$$

$$M_d = (m / n_s) \cdot (60 / 2\pi) \cdot I_k (U \cdot \sin(\beta - \rho) + E_m \cdot \sin \rho) \quad (2.15)$$

Yuvarlak kutuplu senkron makinede moment;

$$M = 3 \cdot U \cdot E_s \cdot \sin \beta / (X_s \cdot W_s) \quad (2.16)$$



**Şekil 2.10: Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörün  $M_d = f(\beta)$  Karakteristiği [26]**

## 2.5 Senkron Generatörde Reaktif Güç Ayarı

Şebeke ile paralel çalışmayan veya tek başına çalışan senkron generatörlerde uyarma akımı büyürse buna bağlı olarak uç gerilimi de büyür. Küçültülürse uç gerilimi küçülür. Gücü çok büyük olan şebeğe paralel olarak çalışan bir senkron generatörün uç gerilimi sabittir.

$\cos\phi=1$  yapan uyarma akımının üstünde bir değere uyarma akımının ayarlanması durumunda generatör şebekeye endüktif akım verir.

Diğer taraftan uyarma akımı  $\cos\phi =1$  yapan değer altında bir değere ayarlanması halinde şebekeye kapasitif akım verir.

Generatörün sabit uç gerilimi ve sabit aktif güçteki çalışma durumunu yani Şekil 2.9 daki vektör diyagramını göz önüne aldığımızda;

$U=\text{sabit}$ ,  $I \cdot \cos\phi=\text{sabit}$  dolayısıyla  $P=\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi=\text{sabit}$ dir. Bu durumda tahrik gücü sabit olacaktır.

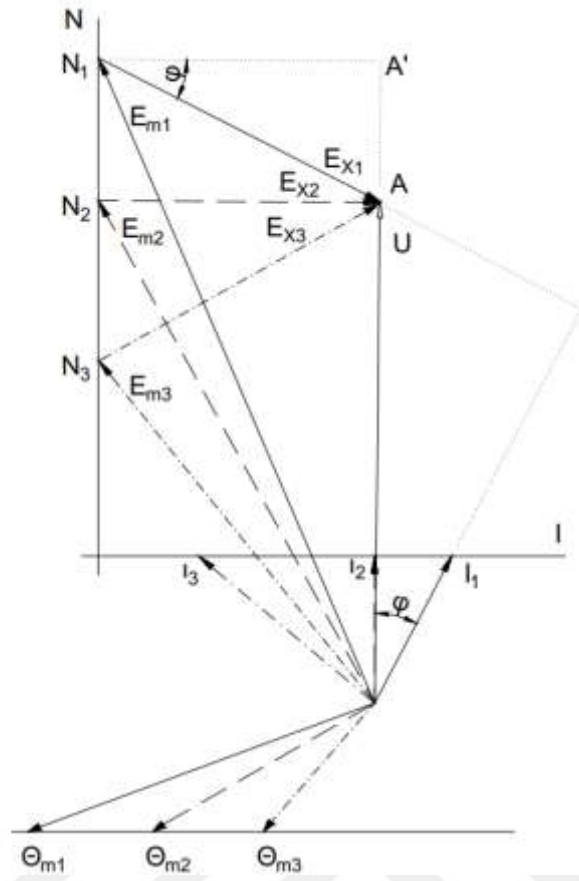
Bu şartlar altında farklı uyarma akımlarındaki durum incelendiğinde;

$$I_1 \cdot \cos\phi_1 = I_2 \cdot \cos\phi_2 = I_3 \cdot \cos\phi_3 = I \cdot \cos\phi = \text{sabitdir.} \quad (2.17)$$

Burada  $I_1, I_2, I_3$  değerleri vektörel olarak değişse bile  $I_n \cdot \cos\phi_n$  değeri her durumda sabit kalacaktır. N doğrusu üzerinde görüldüğü üzere reaktif güç değişmektedir. Değişik uyarma akımlarında N noktalarının yeri değişir. N doğrusunun U fazörüne uzaklığı aşağıdaki gibidir.

$$|AN_2| = |A'N_1| = I \cdot \cos\phi \cdot X_d \quad (2.18)$$

Akımlar uyarma akımlarına bağlı olarak değiştirildiğinde  $I_1$  endüktif,  $I_2$  omik ve  $I_3$  kapasitif yük durumlarına tekabül etmektedir. Aktif güçle orantılı olan  $|AN_2|$  uzaklığı sabit kalacak ve generatörün şebekeye verdiği reaktif güç değişecektir.



Şekil 2.11: Senkron Generatörde Reaktif Güç Ayarı [26]

### 3. SENKRON GENERATÖRLERDE SENKRONİZASYON

Enerji üretim sistemlerinde üretilen elektriğin şebekeye aktarılması belirli aşamalarda diğer bazı operasyonlarla senkronizasyon adı altında yapılan işlemler gereklidir. Senkron generatörler genellikle diğer generatörlerle birlikte aynı şebeke altında çalışmaktadır. Bir generatör ile diğer bir generatörün veya şebekenin akım darbesi meydana getirmeden paralel bağlanmasına paralel bağlanma ya da senkronizasyon denilmektedir.

Şebeke ile generatörün senkron olabilmesi için;

- a. Şebeke gerilimi ile generatörün geriliminin genliklerinin eşit olması ( $V_s=V_g$ ),
- b. Şebeke frekansı ile generatörün ürettiği gerilimin frekansının aynı olması ( $f_s=f_g$ ),
- c. Şebeke faz sırası ile generatörün uç geriliminin faz sırası aynı olmalı, başka bir deyişle şebeke ve generatörün döner alan yönleri aynı olmalıdır  $(RST)_s=(RST)_g$
- d. Şebeke ve generatörün faz gerilimleri eşit ve üst üste çakışmalı ve fazörlerin yönleri aynı olmalıdır ( $\phi_s=\phi_g$ )

Yukarıda ifade edilen 4 maddenin şartları tam olarak sağlandıktan sonra generatör şebekeye güvenli bir şekilde bağlanabilir. Bununla birlikte her bir generatörün şebekeye bağlanabilmesi için kendi içinde izin gerektiren bazı koruma fonksiyonlarının izin vermesi gerekmektedir.

Hatalı senkronlamanın yanı sıra gerek mevcut üretim tesisinde ve gerekse anahtarlama ve iletim hatlarında meydana gelmesi muhtemel acil durumların önüne geçmek amacı ile sistemde koruma röleleri kullanılır. Bu röleler düşük / yüksek frekans , ters güç, diferansiyel, düşük uyarım gibi özelliklere sahiptir. Muhtemel bir hatalı durumda generatörün zarar görmemesi için bu röleler generatörün devre kesicisine (Generatör Circuit Breaker - GCB) açma sinyali gönderir ve generatörü sistemden ayırır. Hatanın giderilmesi sonrasında senkronizasyon işleminin tekrar edilmesi ile ilgili generatör paralel çalışmaya dahil edilir.

### 3.1 Senkronizasyon Yöntemleri

Senkronlama operasyonu, baraya bağlanacak generatörün kumanda edilme durumuna bağlı olarak 2 şekilde yapılır. Senkronizasyon şartlarının sağlanması amacıyla senkron olacak generatörün gerilim ve frekans değerlerinin bara gerilim ve frekansına göre operator aracılığı ile ayar edilmesi ve kontrolünden sonra generatör kesicisinin kapatılması işlemi manuel senkronizasyon diye adlandırılır.

Otomatik senkronlamada ise senkronizasyon rölesi kullanılır. Senkronizasyon rölesi şebeke tarafındaki ve generatör tarafındaki gerilim ve frekansı izleyerek, şebeke parameter değerlerine göre generatörün gerilim ve frekansının dengelenmesi için artır/azalt darbe sinyalleri gönderir. Şebeke ve generatör tarafındaki karşılıklı değerler senkron hale geldiğinde

Senkronizasyon rölesi generatör kesicisine kapatma komutu gönderir ve senkronlama işlemi sonlanır. Otomatik senkronlamada operatörün görevi yalnız senkronlamayı başlatmaktır.

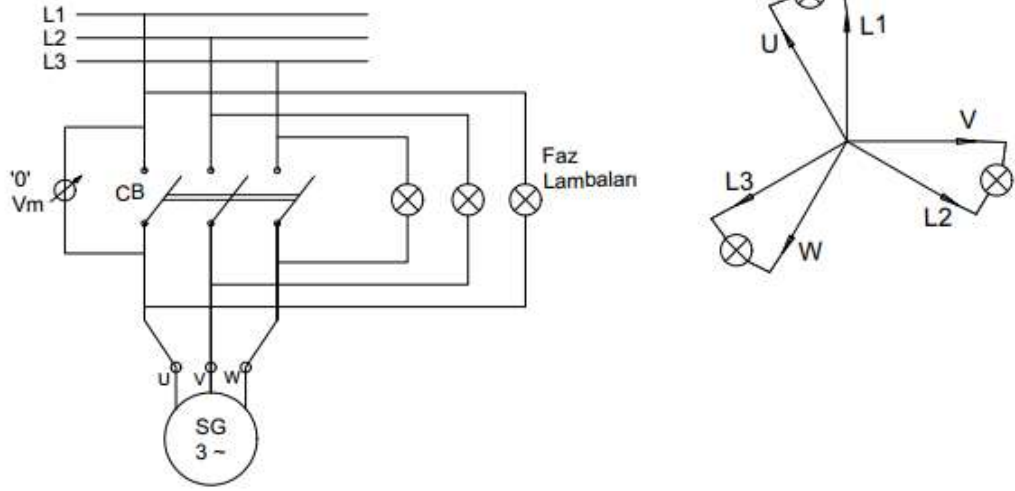
#### 3.1.1 Manuel senkronizasyon

Gerilimlerin eşit olduğuna dair kontrol voltmetreler vasıtasıyla, frekansların kontrolü frekansmetreler ile faz sırasının kontrolü ise döner alanı gösteren lambalar ile yapılmaktadır. Gerilimlerin faz kontrolleri ise aşağıdaki yöntemler kullanılarak yapılır.

1. Sönen ışık düzeneği
2. Yanan ışık düzeneği
3. Döner ışık düzeneği

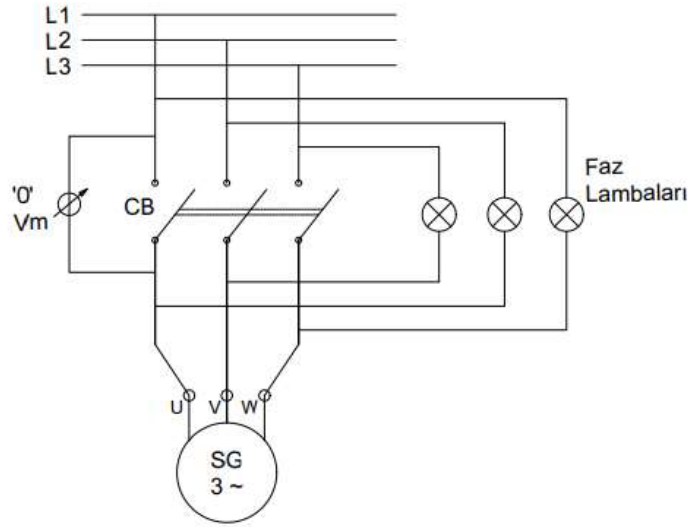
Aşağıda şekil 3.1 de gösterildiği gibi devresi bağlanır ve kontrol yapılarak şartlar sağlandığında şalter kapatılır.

Birbirleriyle aynı fazda olacak şekilde uçlar arasına voltmetreler bağlanır. Voltmetreler hassas olup, dayanım gerilimi  $2U$  şebeke gerilimi kadar olmalıdır. Lambalar söndüğü anda gerilimler üst üste gelmiş demektir.



**Şekil 3.1: Sönen Lamba Montaj Devresi [26]**

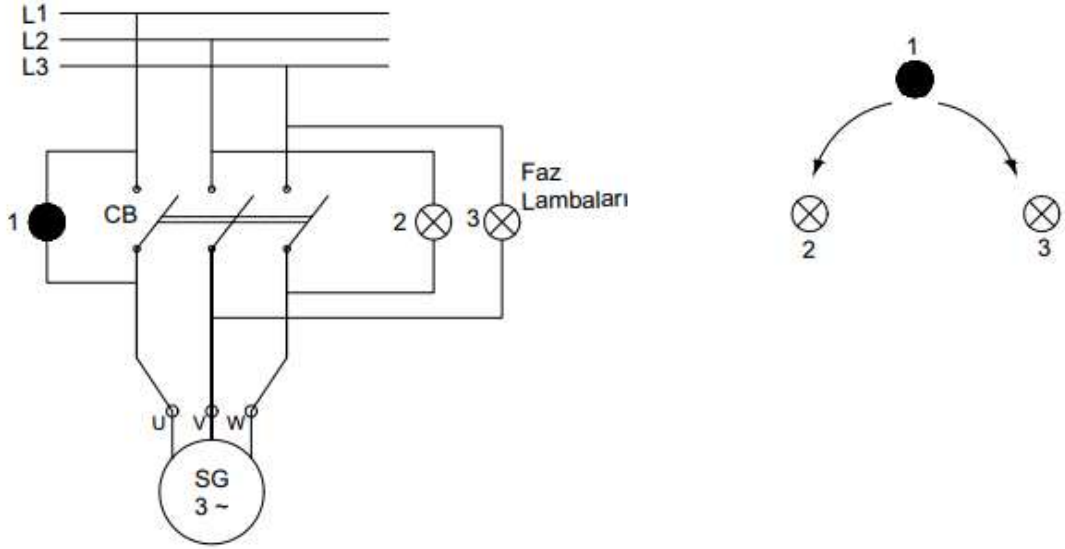
Yanan lamba düzeninde ise lambaların ışık şiddetlerinin ne zaman maksimum olacağı belirlenemediğinden, iki lamba yanan lamba düzenine göre, bir lamba da sönen lamba düzenine göre bağlantı yapılır.



**Şekil 3.2: Yanan Lamba Montaj Devresi [26]**

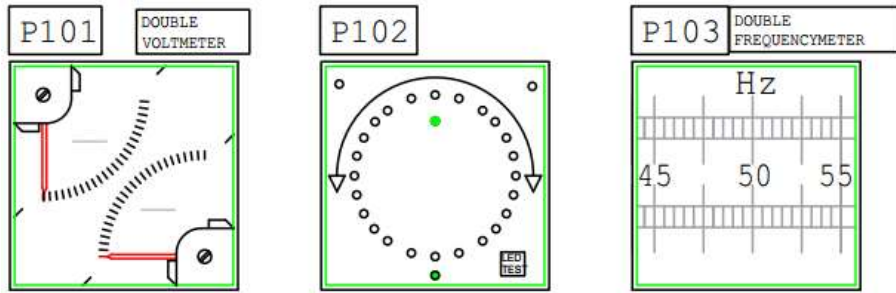
Bu düzenekte ise 1-2-3 no lu lambaların yanıp sönmeye sıraları şebeke ve generatör frekansına bağlı olarak sağa veya sola doğru olacaktır. Frekanslar eşit ise lambalar değişik ışık şiddetlerinde sabit yanar. Frekanslardan biri büyük ise bir yönünde, diğeri büyükse diğere yönünde dönmeye sebep olur. Faz sıralarında değişiklik olursa her 3 lamba yanıp sönmeye başlar. Bu durumda '0' voltmetresinden

kontrol edilerek 1 lamba tam söndüğü, 2 lambanın ise tam parlaklıkta yandığı anda senkronlama yapılabilir ve şalter kapatılabilir.



**Şekil 3.3: Dönen Işık Montaj Devresi Bağlantı Şeması [26]**

Manuel senkronizasyon işleminin uygulamalarından diğer bir tanesi de çift voltmeter çift frekansmetre ve senkronoskop kullanarak yapılan yöntemdir. Bu yöntemde şebeke ve generatör tarafındaki gerilim frekansları aynı anda gösteren çift kadranlı voltmeter ve frekansmetre vardır. Ayrıca şebeke ve generatör fazları arasındaki gerilimlerin farkını gösteren senkronoskop mevcuttur.



**Şekil 3.4: Çift Voltmetre, Çift Frekansmetre ve Senkronoskop[32]**

Şebeke ve Genaratör tarafındaki gerilim ve frekansların eşitliği görüldükten sonra, senkronoskop kontrol edilir. Senkronoskop saat yönünde dönüyor ise Generatörün gerilimi şebekenin geriliminden önde, tersi yönünde dönüyorsa geride demektir. İşaret tam 12 yi gösterdiğinde her iki sistemin fazlarına ilişkin açılar eşit ve senkronlama işlemi gerçekleştirilebilir demektir. Senkronlama için her üç kadrandaki

göstergelerin uygun olması durumunda, generatör kesicisine (GCB) operator tarafından “kapat” komutu gönderilir.

### 3.1.2 Otomatik senkronizasyon

Otomatik senkronizasyon operasyonunda generatörün şebeke ile paralel çalışabilmesi için otomatik senkronlama cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazlar kontrol fonksiyonlarına sahiptir ve aynı zamanda generatörün ve şebekenin frekans ve gerilim bilgilerini alıp değerlendiren ve ilaveten generatörün gerilim ve frekansının şebeke ile senkron olması için artır / azalt darbe sinyalleri gönderen fonksiyonları da mevcuttur.

Şebeke ile Generatör senkron pozisyonu oluştuğunda, generatör kesicisine “Kesici Kapat” komutu göndererek senkronlama işlemini gerçekleştirir. Kısaca otomatik senkronlama işleminde operasyonlar bütünüyle senkronizasyon rölesi tarafından yapılırken, operatorun etkisi sadece senkronlama işlemini başlatmaktan ibarettir.

Senkronizasyon cihazı senkronlama işlemini gerçekleştirirken, üzerinde bulunan gerilim girişlerinden V1olanı referans gerilim olarak kabul eder. V2 olan ikincil girişi generatörün gerilim girişi olarak algılar. Bu giriş değerleri frekans parametresi için de geçerlidir. Senkronizasyon rölesi gerilim ve frekans dengelemesi için generatöre dengeleme komutları gönderir.



**Şekil 3.5: Üç Fazlı Otomatik Senkronizasyon Cihazı (Rölesi)[29]**

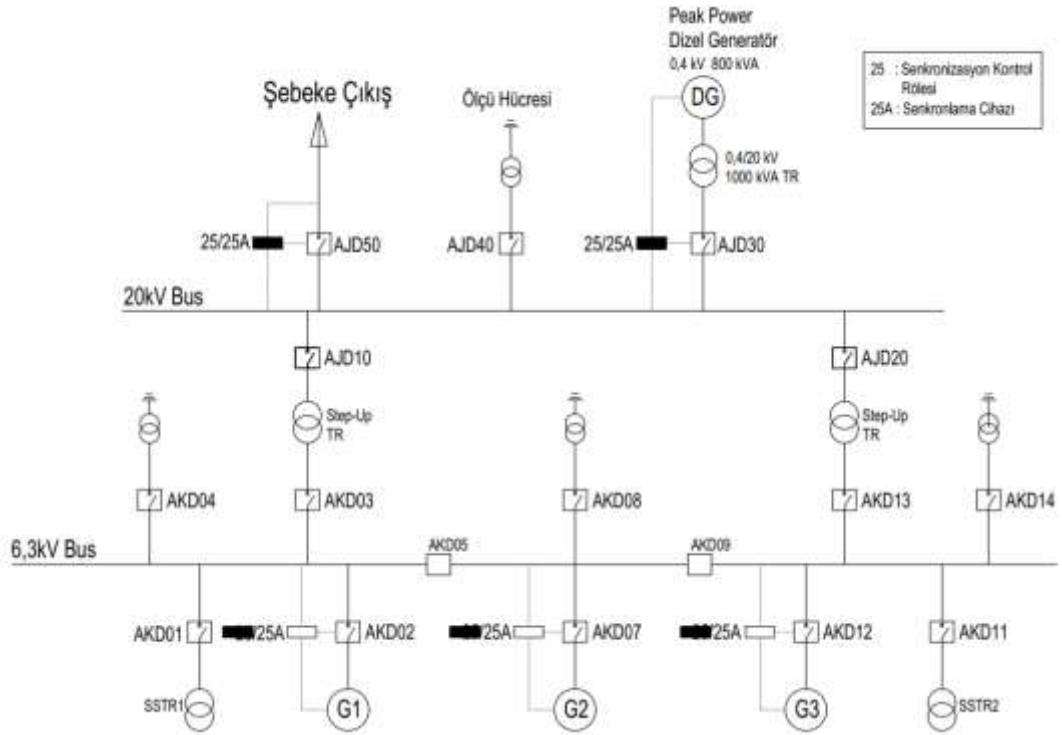
Örnek olarak şekil 3.6 da gösterilen elektrik üretim tesisi ve şebekeyi besleyen tek bir santral şebekesi ele alındığında senkronizasyon işlemi bu şebeke üzerinde yapılmaktadır.

Söz konusu santralde 3 adet çıkık kutuplu, 13 çift kutuplu (230,76 devir/dak), 6,3 kV 2,6 MW ve 50 Hz frekansında gerilim üreten hidrogeneratör kullanılmaktadır. Bu şemada, şebekeden talep edilen toplam güç 7,8 MVA yı aşması halinde, artan

talep gücünü karşılamak için 800 kVA gücünde Peak Power Dizel Generatör kullanılmaktadır.

Hidrogeneratörlerin endüvi çıkış gerilimi 6,3 kV dur. Her hidrogeneratör 6,3 kV baraya senkron olmaktadır. Mevcut şebekeyi besleyen yalnız bir üretim tesisi olduğundan (Island Mode), şebekede, 20 kV barada ve 6,3 kV barada enerji mevcut değil iken şebekenin enerjilendirilmesi ölü bara operasyonu (Dead Bus Mode) ile devreye alınmaktadır. Bu durumda ilk enerjilendirmede senkronizasyon metodları uygulanmamaktadır.

Ölü baranın enerjilendirilmesi için hidrogeneratördeki gerilim değerinin ve frekansının nominal gerilim ve frekansına göre belirli bir oranda olması istenir. Bu durumda bile AJD50 deki devre kesicisinin açık olması istenir. 20 kV baradaki gerilim nominal değerinin 20 kV ve frekansın 50 Hz olduğu durumda AJD50 Devre kesicisi kapatılarak şebeke enerjilendirilir.



Şekil 3.6: Elektrik Üretim Santrali Prensip Bağlantı Şeması [32]

Bağlantı şemasında belirtilen bara giriş - çıkış hücreleri, devre kesicileri ve ölçü hücreleri ile ilgili adlandırmalar aşağıdaki listede ifade edilmektedir.

Şemada, 6,3 kV baraya bağlı;

- AKD01 Station servis trafo-1 hücresi

- AKD02 Hidrogeneratör-1 kesici hücresi
- AKD03 20kV bağlantı hücresi-1
- AKD04 Gerilim ölçü hücresi-1
- AKD05 Bus-Coupler -1 hücresi
- AKD06 Bara yükseltme (bus riser) hücresi
- AKD07 Hidrogeneratör-2 kesici hücresi
- AKD08 Gerilim ölçü hücresi
- AKD09 Bus-Coupler-2 hücresi
- AKD10 Bara yükseltme (bus-riser) hücresi
- AKD11 Station servis-2 trafo hücresi
- AKD12 Hidrogeneratör-3 kesici hücresi
- AKD13 20kV bağlantı hücresi-2
- AKD14 Gerilim ölçü hücresi-2

Hidrogeneratörlerin şebeke ile senkronizasyonu 14 hücreden meydana gelen 6,3 kV bara bölümünde yapılmaktadır. AKD02 kesicili hücre üzerinden hidrogeneratör-1, AKD07 kesicili hücre üzerinden hidrogeneratör-2 ve AKD12 kesicili hücre üzerinden hidrogeneratör-3 şebeke ile senkron olmaktadır.

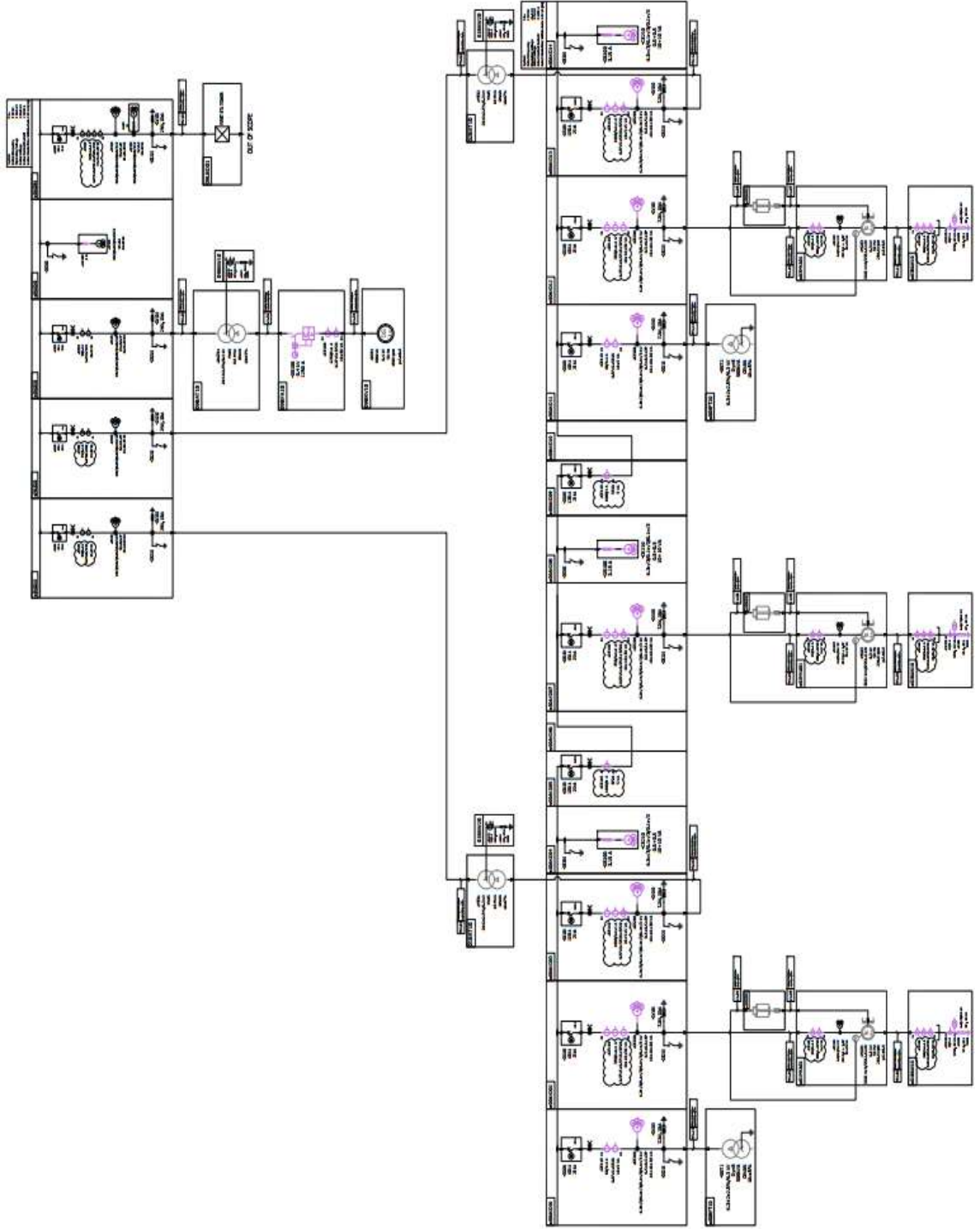
Her hidrogeneratörün şebeke ile bağlantı bölümleri 2 adet bus-coupler kesicili hücre ile birbirinden ihtiyaca göre ayrılabilir.

Sistemde 2 adet Station servis-trafo mevcuttur. Bu trafolar birbirinin yedeği olarak çalışmakta ve santralin elektrik iç ihtiyacını karşılamının yanında kumanda ve kontrol sistemlerinin ihtiyaç duyduğu elektriği sağlamaktadır.

AKD03 ve AKD13 hücreleri 6,3 kV bara ile şebeke gerilimi olan 20 kV bara arasındaki bağlantı hücreleridir.

20kV baraya bağlı;

- AJD10 6,3 kV bara bağlantı hücresi-1
- AJD20 6,3 kV bara bağlantı hücresi-2
- AJD30 Peak power DG bağlantı hücresi
- AJD40 20 kV ölçü hücresi
- AJD50 Şebeke çıkış hücresi



**Şekil 3.7: Elektrik Üretim Santrali Tek Hat Şeması [32]**

20 kV gerilimli AJD10 ve AJD20 hücreleri 6,3 kV kesicili bara bağlantı hücresi olarak dizayn edilmiştir. Bu hücreler birbirinin yedeği olarak çalışmaktadır.

AJD30 kesicili hücre, hidrogeneratörlerin ürettiği elektrik enerjisinin şebekeden talep edilen elektriği karşılayamaması durumunda devreye girmektedir.

Peak power dizel generatörün şebeke ile senkronizasyonu, 20kV baradaki AJD30 da gerçekleştirilmektedir.

AJD 40 ölçü hücresi olup, gerilimler bu hücrede ölçülmektedir.

AJD50 hücresi ise şebeke çıkış hücresidir. Bu hücrede ayrıca santralden şebekeye transfer edilen enerjinin kwh olarak ölçülebilmesi için akım trafolarını da içermektedir.

### **3.2 Generatörler İçin Devreye Alma Senaryoları**

Santralin enerjilendirilip şebeke sistemine bağlanabilmesi için 3 senaryo sözkonusudur.

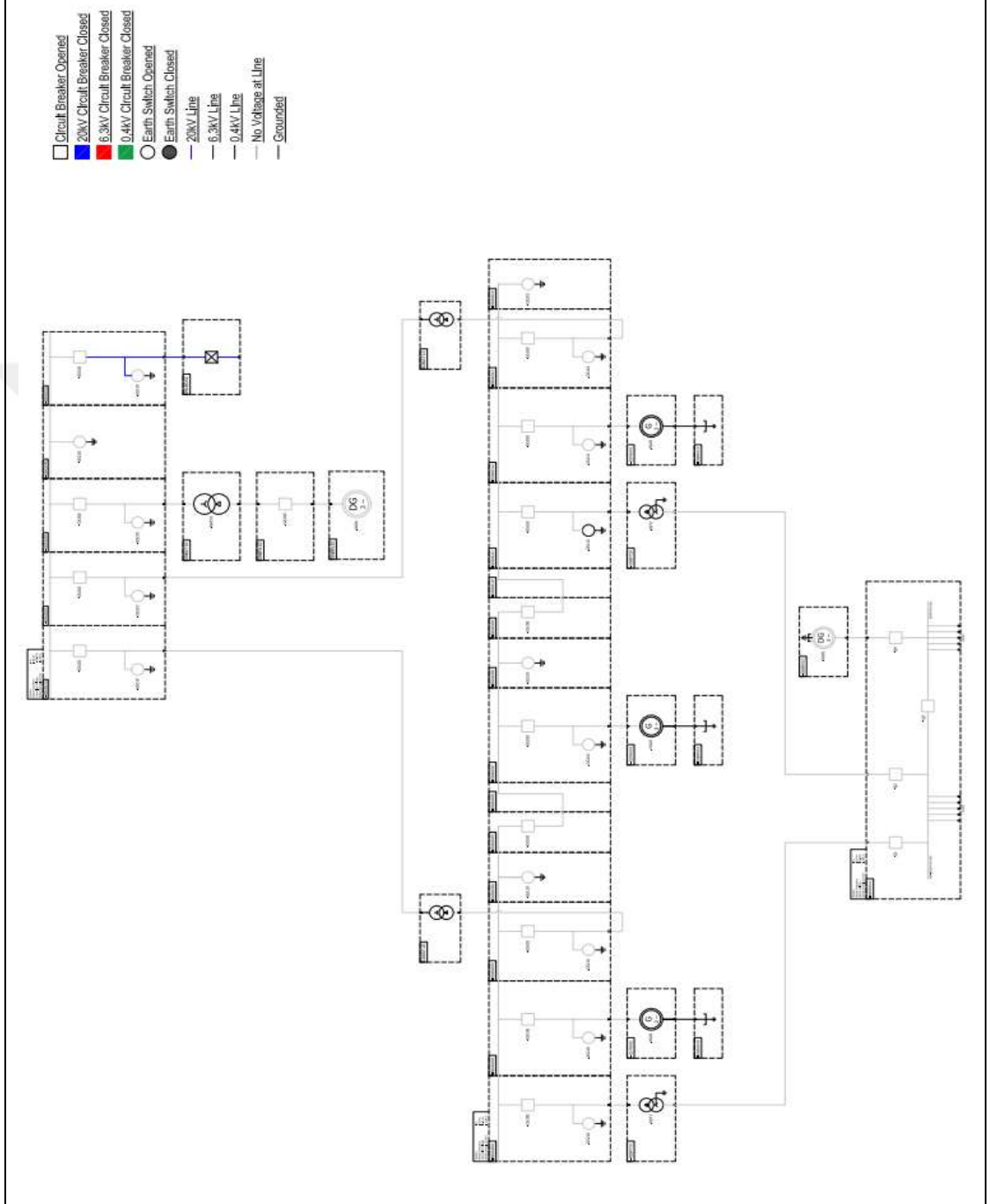
1. Şebekenin enerjili olması durumunda; 20 kV ve 6,3 kV baraları kullanılarak santral servis trafosunun enerjilendirilme işlemi yapılır. Kontrol ve kumanda sisteminin (Essential power) enerjilendirilmesi sonrasında Hidrogeneratör devreye alınır. Senkronizasyon rölesi vasıtasıyla 6,3 kV bara ile senkronize edilir.
2. Şebekede ve santralde enerjinin olmaması durumunda; Alçak gerilim tarafında bulunan tesisin yedek dizel generatörü vasıtasıyla kumanda kontrol sistemi enerjilendirilerek Hidrogeneratör devreye alınır. Servis trafosu üzerinden alçak gerilim sistemi senkron edilir ve Servis Dizel Generatör devreden çıkarılır.

Burada ilk başlatılan hidrogeneratör için ana baraya bağlantı sırasında, ana barada enerji olmaması nedeniyle senkron rölesi black-start modunda çalışacaktır.

3. Sıfır Gerilimli Başlangıç (Black-Start) olarak Peak Power Dizel Generatör ile başlatma senaryosunda; Şebekede enerji yoktur. Peak Power Dizel Generatör devreye alınır ve 0,4/20 kV Step-up trafo üzerinden 20 kV bara enerjilendirilir. 6,3 kV bara vasıtasıyla alçak gerilim kontrol ve kumanda sistemi enerjilendirilerek Hidrogeneratör devreye alınır ve 6,3 kV bara ile senkronizasyon gerçekleştirilir. Sistemin Hidrogeneratör tarafından beslenmesi gerçekleştikten sonra Peak Power Dizel Generatör devreden çıkarılarak durdurulur.

Yukarıda açıklanan 3 tip devreye alma senaryosuna ilişkin detaylı şemalar ve açıklamalar

Ek. C' de yer almaktadır.



Şekil 3.8: Sistem Devreye Alma Senaryo Şeması Örneği [32]

### 3.3 Hidroelektrik Santralında Woodward SPM-D10/YB Rölesi ile Senkronizasyon Şartlarının İncelenmesi

Gerilim altında çalışan iki veya daha fazla elektrik sisteminin paralel olarak bağlanabilmesi aşağıdaki şartların sağlanması zorunludur.

- 1 – Faz sıralarının aynı olması
- 2 – Dalga şekilleri benzer olması
- 3 – Gerilimin genliklerinin eşit olması
- 4 – Eşit frekans değerlerine sahip olması
- 5 – Fazlar arası açıların birbirine eşit olması

Faz sıralarının eşit olup olmadığı, tesis kurulup devreye alınması sırasında belirlenerek buna göre bağlantıları yapılır. Faz sıraları bakımından sistemin bir defa doğru şekilde devreye alınmasından sonra, sistemde daha sonra bağlantı değişikliği yapılmadıysa tekrar kontrol edilmesine gerek duyulmaz. Generatörde üretilen dalga şeklinin ise generatörün üretimi ile ilgili olduğundan müdahale edilme imkanı bulunmamaktadır. Buna karşın paralel olarak çalışacak sistemin gerilim genlikleri ve frekansları senkronizasyon işlemi öncesi kontrol edilmelidir. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), C50.12 [12] ve IEEE C50.13 standardı gereği her iki sistem operasyona alınırken aşağıdaki senkronizasyon limitleri dikkate alınır.

Her iki elektrik sistemi için

- Gerilim farkı:  $\pm \%5$
- Frekans farkı:  $\pm 0,067$  Hz
- Faz açıları arasındaki fark:  $\pm \% 10$

olarak belirlenmiştir. Bu değerler şebekeye bağlı en az 2 santral olması durumunda uygulanır. Şebekede ani yük artışı ve azalışları sırasında frekansın ve gerilimin değişme durumu gerçekleşmez.

Ancak, şebekeyi besleyen tek bir santral olması durumunda (island mode), frekans farkı en fazla  $\pm \%4$  yani 2 Hz olmalıdır. Şebekede ani yük artışı olması durumunda sistemin anlık frekansı düşmekte ve santral ünitelerinin koruma devrelerinde bulunan röleler vasıtasıyla düşük frekanstan (under frekans) sistem

açmaktadır. Ani olarak şebeken kayda değer bir yükün atılması durumunda ise frekans yükselmekte ve sistem aşırı frekans hatasından (over frekans) açmaktadır. Bu nedenle her iki sistem arasındaki frekans farkını röle üzerinde düşük frekansdan açma limiti olarak 48 Hz ve yüksek frekansdan açma limiti olarak da 52 Hz değerleri girilmektedir. Daha düşük değer girilmesi durumunda sistem frekans hatasından açmaktadır. Generatörün devreye alınma sürecinde bir çok kez yapılan denemeler sonucunda bu değerlerde bazı küçük değişikliklerin yapılması normal karşılanabilmektedir.

### **3.4 Hatalı Senkronizasyon Durumları**

#### **3.4.1 Gerilim eşitsizliği**

Gerilim eşitliği sağlanmadan generatörlerin şebekeye paralel olarak bağlanması durumunda şebekeden generatöre veya generatörden şebekeye doğru dengeleme akımları oluşmaktadır. Generatörün çıkış gerilimi şebeke geriliminden yüksek olması halinde (I) stator akımı da artar. Bu durumda generatör şebekeye reaktif akım vermeye başlar ve bu akım endüvi üzerindeki ısıyı yükselterek generatörde termik zorlanmalara sebep olmaktadır. Generatör geriliminin şebeke geriliminden düşük olması durumunda ise, şebekeden generatöre doğru reaktif akım akar ve ters yönde akan bu akım generatörde yine termik ve dinamik zorlanmalara neden olur.

#### **3.4.2 Faz açılarının eşitsizliği**

Faz açılarının eşitliği sağlanmadan generatörlerin birbirine veya şebekeye bağlanması durumunda gerilimlerin mutlak değerleri eşit olsa dahi vektörel eşitsizlik nedeni ile aralarındaki faz farkı oluşur ve bu nedenle dengeleme akımları meydana gelir. Oluşan bu dengeleme akımları generatör milinin hasar görmesi dahil olmak üzere generatör üzerinde çeşitli dinamik ve termik zorlanmalara sebep olabilir.

#### **3.4.3 Frekans eşitsizliği**

Senkron makina olan generatörler paralel olarak işletmeye alındıklarında tek bir makina gibi davranarak yükü paylaşırlar. Paralel bağlı generatörler arasında frekans farkı olduğunda, generatörler bu farkı azaltacak şekilde daha hızlı veya daha yavaş dönmeye çalışırlar. Bu durum hızlı dönen generatörde frenlemeye, yavaş

dönen generatörde ise hızlanmaya neden olur ve mil ve yataklarında mekanik problemler meydana getirir.

Hatalı senkronizasyon işlemi sonucunda meydana gelen mekanik arızalarla birlikte sistemin elektrik kalitesinde de bir takım sorunlar oluşur. Şebekeyi besleyen generatörlerin gücü düşük olduğu sırada şebekeye paralel operasyona alınan büyük güçlü generatör, devreye girdiği sırada, şebekede büyük gerilim dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bununla birlikte generatörün reaktif güç üretmesi veya tüketmesi şebeke verimini azaltıcı yönde etki etmektedir. Şekil 2.6 da  $E=f(I_m)$  eğrisinden de görüldüğü üzere stator da endüklenen gerilim uyarım akımına bağlı olarak değişmektedir. Senkron generatörün uyarım devresi manuel modda iken generatörün üretmiş olduğu gerilim şebeke geriliminden düşük ise şebekede gerilim düşümüne neden olur. Generatörün uyarım devresi otomatik modda olması ve generatörün geriliminin şebeke geriliminden yüksek olması halinde durum daha kritik hale gelir. Bu durumda otomatik gerilim düzenleyici uyarım akımını azaltarak generatörün veriminin düşmesine sebep olmaktadır.

Bu tür hatalı senkronizasyonun paralel bağlanmaya çalışan generatöre zarar vermemesi için sistemde sayısal koruma röleleri kullanılmaktadır. Bu koruma röleleri düşük frekans, yüksek frekans, ters güç, düşük uyarım gibi koruma fonksiyonlarına sahiptir. Olası bir hatalı senkronizasyon durumunda bu röleler generatörün kesicisine açma komutu göndererek generatörü şebekeden ayırır. Bu operasyon yükleri besleyen generatörde gerçekleştiğinde sistemin enerjisiz kalmasına sebep olmaktadır.

Yukarıda ifade edilen gerilim farkı, frekans farkı ve faz açıları farkı senkronizasyon şartları bakımından elzemdir. Bu şartlarla birlikte her bir generatörün koruma ve kumanda devreleri üzerinde bazı diğer şartlar mevcuttur.

Genel olarak bu şartlar;

- Genel arıza bilgisi
- Sistem scada üzerinden otomatik Senkronizasyon Mode veya Manuel Mode bilgisi
- İlgili ünitenin kesici durum bilgisi
- Ünite servis pozisyonunda ya da test pozisyonunda

- İlgili ünite devresinde toprak arıza durum bilgisi
- Generatör rotor arıza durum bilgisi
- Generatör stator durum bilgisi
- Ünite koruma rölelerinden gelen arıza bilgisi
- Ünite PLC panelinden gelen durum bilgisi
- Ünite PLC panelinden gelen senkronizasyona hazır durum bilgisi
- Bara enerji durum bilgisi
- Senkronizasyon rölesi durum bilgisi
- Senkronizasyon rölesi oto senkron / dead-bus seçim bilgisi
- Senkronizasyon rölesinin gerilim genlik ve frekans müsaade bilgisi

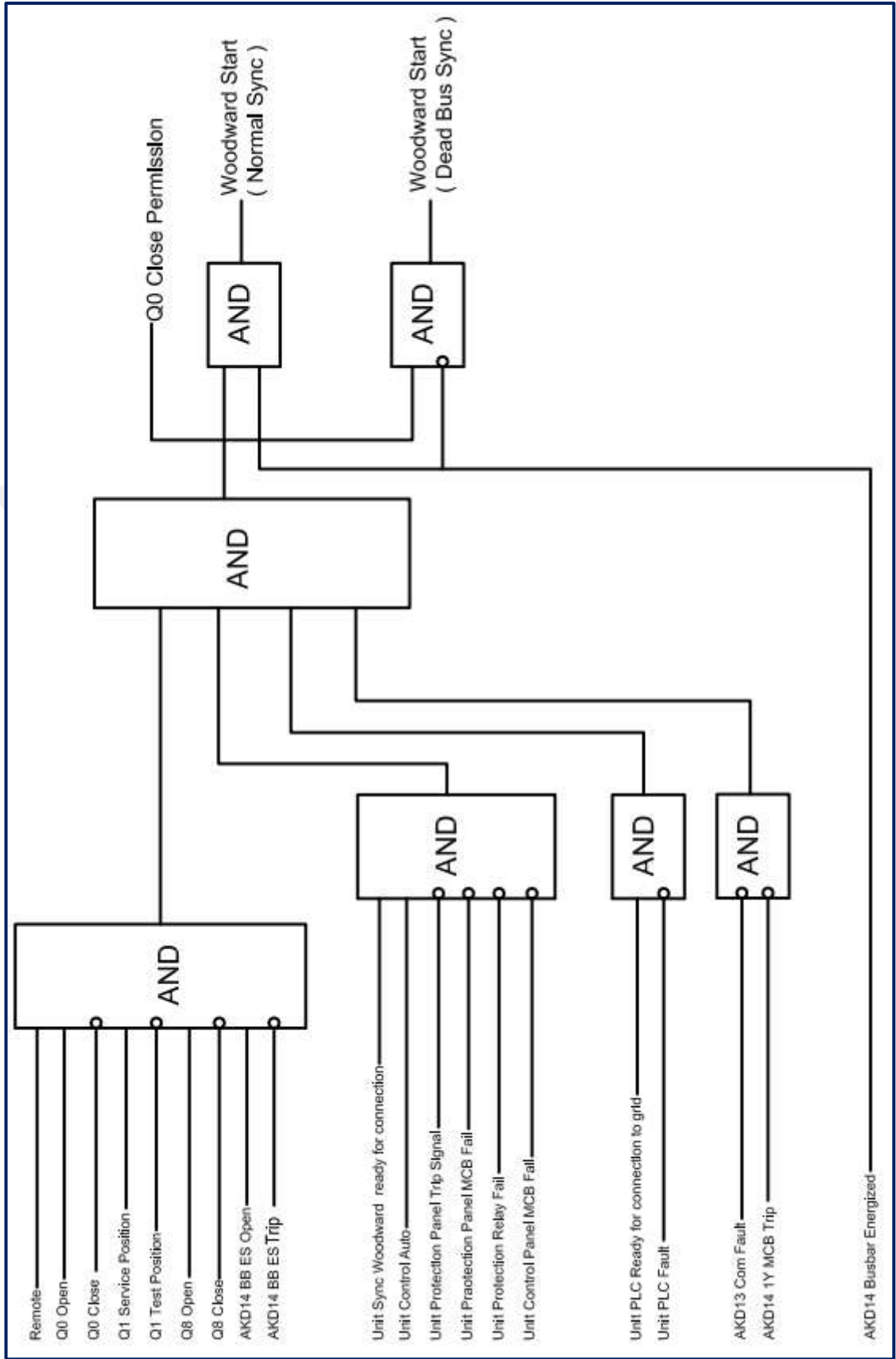
Generatörün şebekeye senkronizasyonu için olan çalışmada, Woodward marka SPM-D10/YB kodlu senkronizasyon rölesi kullanılmıştır.

Bir generatörün şebekeye veya diğer generatöre paralel bağlanması için gerekli koruma ve kumanda parametreleri Şekil 3.9 daki lojik kapı diagramında görülmektedir. Woodward senkronizasyon rölesi ile generatörün paralelleme yapılabilmesi için bu şartların hepsinin gerçekleşmesi gerekmektedir.

Şekil 3.9 daki lojik kapı diagramından da görüleceği üzere senkronizasyon rölesi otomatik senkronizasyon fonksiyonu ile birlikte ölü-bara (dead-bus) senkronizasyonu fonksiyonunu da gerçekleştirmektedir.

Normal Senkronizasyonda ve dead-bus senkronizasyonunda koruma ve kumanda fonksiyonlarının tamamı geçerli olmakla birlikte, Dead Bus senkronizasyonunda V2 olarak ifade edilen şebeke gerilimi 0 (sıfır) volt olması nedeni ile şebeke generatörün gerilim genliği, faz açısı ve frekans şartı yoktur.

Şebeke barasının enerjisiz olması nedeni ile şebeke barasına (Dead Bus) senkron olacak generatör doğrudan bağlanmaktadır. Ancak ölü baraya bağlanacak olan generatörün üretmiş olduğu gerilimin genliği ve frekansı röleye tanıtılan nominal gerilim ve nominal frekansa eşit olmak zorundadır. Aynı zamanda generatör ve bara üzerindeki koruma, kumanda ve diğer durum şartlarının geçerli olması zorunludur.



Şekil 3.9: Örnek Ünite Senkronizasyonu için Lojik Kapı Diyagramı [32]

### 3.5 Senkronizasyon Koruma ve Kumanda Panosu

Elektrik Üretim Santrallerinde her bir generatör veya her bir ünite için senkronizasyon ve kumanda panosu ile birlikte koruma panosu kullanılmaktadır. Senkronizasyon ve kumanda panosunda kumanda devreleri ve ünite durum bilgilerinin gösteren göstergeler yer almaktadır. Senkronizasyon işleminin manuel mod ve otomatik mod seçenekleri mevcut olup, şalter üzerinden manuel mod seçildiğinde çift voltmetre, çift frekansmetre ve senkronoskop göstergeleri yardımı ile senkronizasyon şartları kontrol edilir. Generatör ve şebeke gerilim ve frekanslarının eşitliği veya belirlenen sınırlar içine girmesi için [+ - V] ve [+ - f] mandalları vasıtasıyla belirlenen aralığa gelinceye kadar ayar işlemi devam eder. Senkronizasyon şartlarının gerçekleştiği görüldüğü anda start verilir ve generatör şebekeye senkron olur.

Generatörün şebekeden ayrılması istendiğinde stop butonuna basılır ve generatör devre kesicisinin devreyi açması ile şebekeden ayrılır.

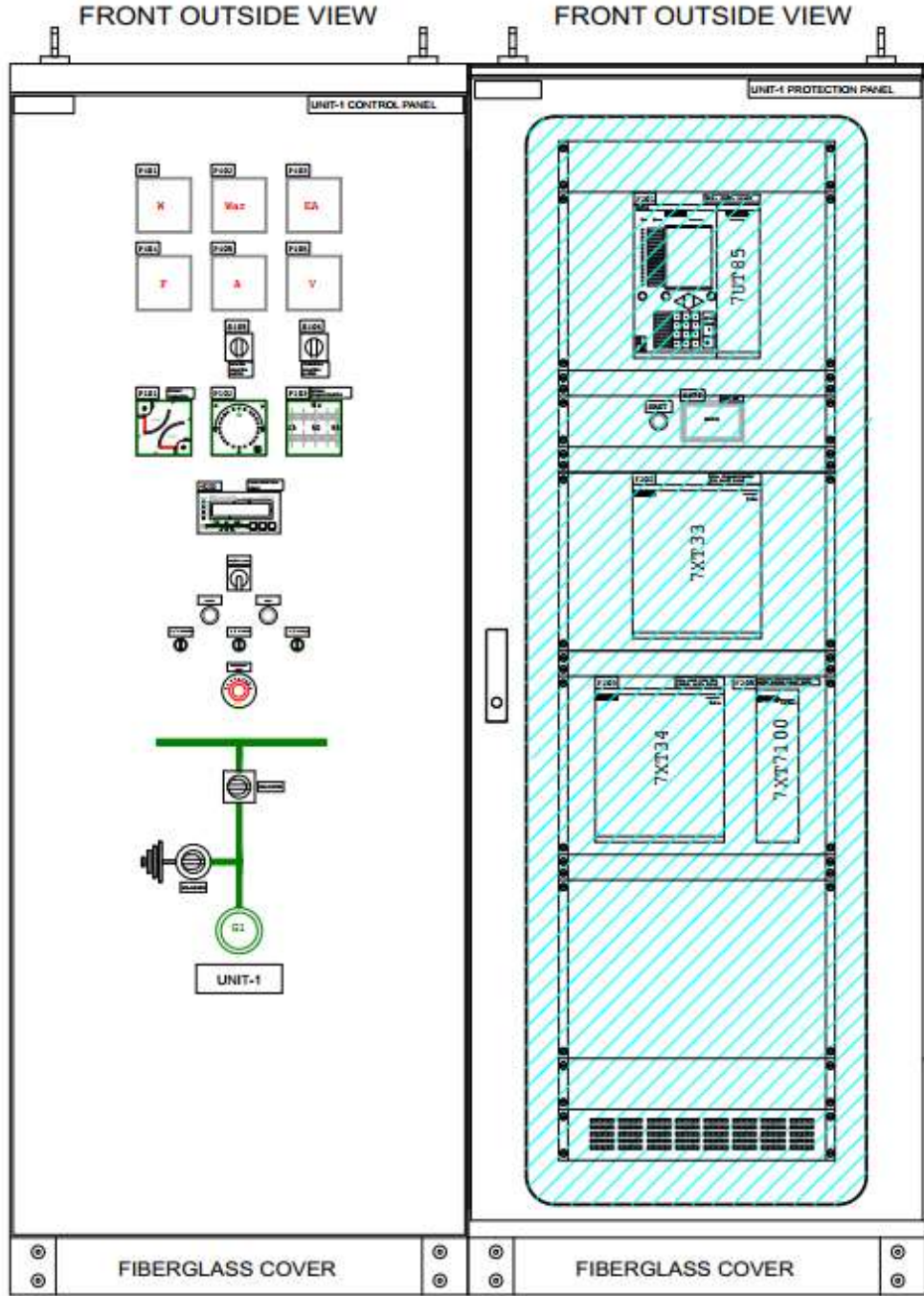
Şekil 3.10 da generatör koruma panosunda;

- Rotor toprak hata koruma rölesi,
- Stator toprak hata koruma rölesi,
- Genel kapsamlı generatör toprak hata rölesi,
- Arıza durumunda generatör devrelerini izole etmek ve sorun çözülene kadar arızalanan devrenin yeniden enerjilendirilmesini önleyen kilitleme rölesi kullanılır.

Generatör koruma röleleri durum, hata ve arıza durumlarını sistem haberleşme sistemi üzerinden scadaya aktarmaktadır. Scada ekranı üzerinden verilen komutlar aracılığı ile sistem işletim senaryosuna göre sistem devreye alınır ve generatörün senkronizasyonu sağlanarak talep edilen güç şebekeye transfer edilir.

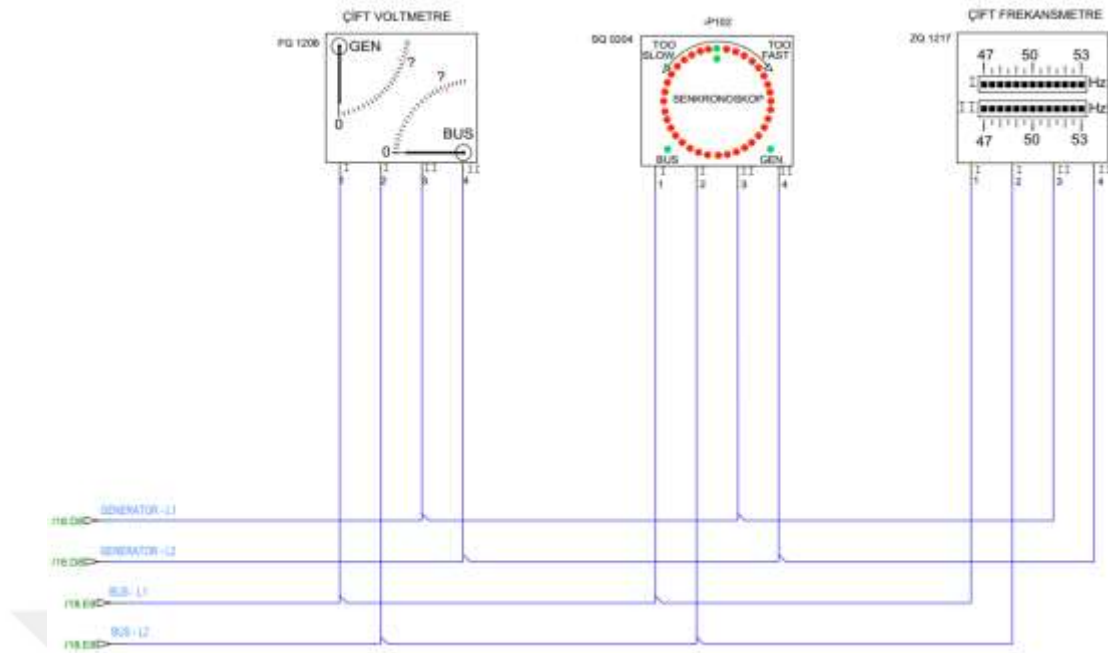
Faizabad Hidroelektrik Santralinde generatör koruma röleleri olarak;

- Siemens marka 7 serisi 7XT7100
- Siemens marka 7 serisi 7XT34
- Siemens marka 7 serisi 7UT85 kullanılmıştır.



**Şekil 3.10: Senkronizasyon Panosu Ön Görünümü [32]**

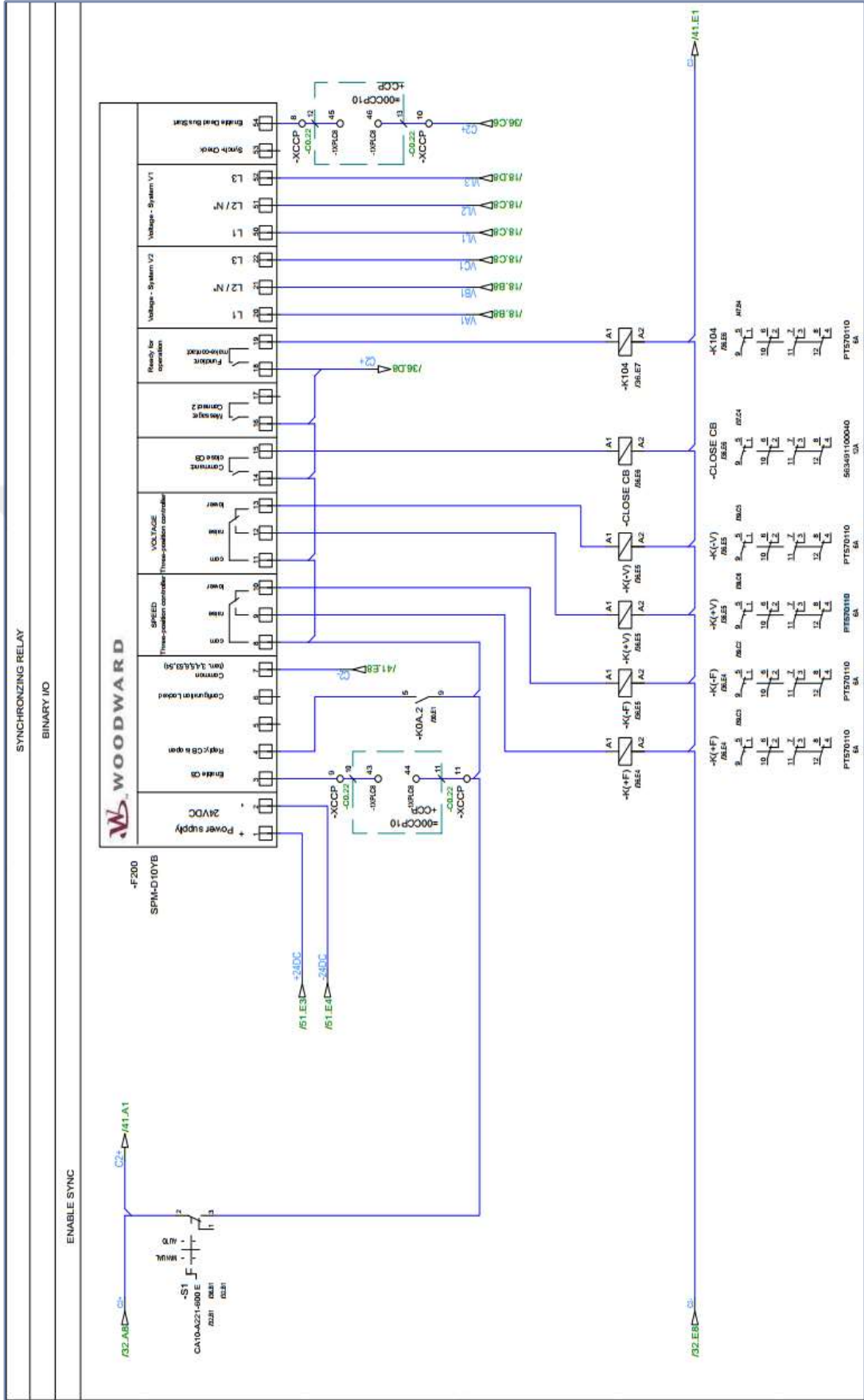
Senkronizasyon işlemi sırasında çift voltmetre, çift frekansmetre ve senkronoskop göstergeleri üzerinden anlık gerilim, frekans ve faz açıları görsel olarak da görülmektedir. (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11: Çift Voltmetre, Çift Frekansmetre ve Senkronoskop Bağlantı Şeması [32]**

Bağlantı diyagramından da görüleceği gibi gerilimler faz-faz arası gerilim değerleri dikkate alınarak ölçümler yapılmaktadır. Faz arası gerilim değerleri, bara gerilimini ölçü cihazlarının etiketinde yazan değer olan 100 V'a düşürülerek ölçülmektedir. Bu nedenle gerilim trafosunu gerilim dönüştürme oranı ile ölçü cihazının gerilim değerinin eşit olması istenir. Aynı şekilde bu kural frekans ve senkronoskop cihazları için de geçerli olmaktadır.

Çift voltmetre göstergesi üzerindeki kadranından bir tanesi, şebekeye senkron olacak generatörün geriliminin L1 ve L2 fazları arasındaki gerilimdir. Diğer gösterge ise şebeke hattının L1 ve L2 fazları arasındaki gerilimdir. Çift frekansmetre kadranı üzerinde generatör ve şebeke fazlarına ilişkin frekans değerleri gösterilmektedir. Generatörün şebekeye senkron olabilmesi için gerilim ve frekans değerlerinin eşit olması ve aynı zamanda senkronoskop göstergesinin saat 12 yönünde olması gerekmektedir. Senkronizasyon operasyonu otomatik moda olsa bile şekil 3.11 deki göstergeler gerçek değerleri göstermeye devam eder. Manuel mod operasyonunda, operator göstergeleri dikkate alarak GCB ye kapat sinyali göndererek senkronizasyonu gerçekleştirir.



Şekil 3.12: Senkronizasyon Rölesi Bağlantı Şeması [32]

Senkronizasyon panosuna montajı yapılan senkronizasyon cihazının (woodward/ SPMD10/YB) pano bağlantı şeması Şekil 3.12 de görülmektedir. Röle enerjisi 24 V/DC barasından verilmektedir. Ek-A da üretici tarafından sağlanan senkronizasyon cihazının bağlantı şeması gösterilmektedir.

Otomatik senkronizasyon işlemi için, senkronizasyon yapılacak bara enerjili olması durumunda koruma panosundan senkronizasyon müsaade bilgisi 3 nolu klemensden alınmaktadır. Şemada,  $V_1$  bilgisi şebekeye ait gerilim iken,  $V_2$  bilgisi senkron olacak generatörün gerilim bilgisidir. Röle  $V_1$  ve  $V_2$  bilgilerini gerilim genlik, faz açısı ve frekansını karşılaştırmakta, konfigürasyon sırasında röleye girilen değerler arasında kalması durumunda generatör devre kesicisini kapatarak generatörü baraya senkron etmektedir. Eğer gerilim ayarlanan aralığın dışında ise gerilim ve frekans artır-azalt komutları cihazın 8-9-10 ve 11-12-13 nolu klemenslerinden generatör governor panosuna gönderilir ve senkronizasyon şartları röleye set edilmiş olan zaman süreci içinde sağlanmaya çalışılır. Değerler elde edildiği anda röle 15 no'lu klemens üzerinden devre kesiciye kapat komutu gönderir ve sistem senkron olur.

Ölü bara operasyonunda ise  $V_1$  gerilim bilgisi 0 V dur. Bununla birlikte generatörde üretilen  $V_2$  değeri sistem nominal değeri olan  $V_N$  eşit olmalıdır. Aynı şekilde generatörde üretilen gerilimin frekansı da  $f_n$  50 Hz ise 50 Hz olmalıdır.

### 3.6 Senkronizasyon Rölesinin Konfigürasyonu

Generatörün ve çevre birimlerinin montajı tamamlandıktan sonra test ve devreye alma süreci başlar. Bu süreçte generatör senkronizasyon rölesinin (Woodward/SPMD10/YB) yapılandırılması gerekmektedir. Rölenin yapılandırılması aşağıdaki başlıklar altında yapılır.

- I. Genel yapılandırmalar: Röle kullanım yetkilendirmesi, şifre koruma, fabrika varsayılan ayarına dönüş seçeneği, anma gerilim değerleri, anma frekans değerleri, kontrol sistemi gerilim değeri v.b.
- II. Frekans Kontrol Yapılandırması: frekans kontrol hassasiyeti, hız ayar rampa ayarı, minimum frekans kontrol süresi, Şebeke (bara) ve generatör frekans anma değerleri,

- III. Gerilim Kontrol Yapılandırması: Gerilim kontrol izni, Gerilim kontrol hızı rampa ayarı, gerilim kontrol hassasiyeti, gerilim kontrol periyodu v.b.
- IV. Senkronizasyon Fonksiyon Yapılandırması: senkronizasyon kontrol modu, offset frekansı, müsaade edilen maksimum ve minimum frekans farkı ( $V_1$ - $V_2$ ) kaynaklarına ilişkin frekans değerlerinin nominal frekansa yakınlığı), izin verilen maksimum ve minimum gerilim farkı, rölenin sağladığı minimum darbe süresi, faz açısı kontrolü vb.
- V. Ölü Bara / Dead Bus Yapılandırması: Soğuk başlatma (Black Start) olarak da adlandırılır. Soğuk başlatma modunu seçme, gerilim kaynağının  $V_1$  ve  $V_2$  olarak belirlenmesi, Soğuk başlatma modunda üretilen gerilimin nominal gerilimle fark değeri limiti, Generatörün ürettiği gerilim frekansının fark değeri limiti v.b.

Yapılandırma ile ilgili olarak, çalışmanın ekinde (Ek-B) tüm konfigürasyonun kapsamı, ayar aralıkları ve standart değerleri gösteren Çizelge yer almaktadır. [29]

Bu çalışmada; Türkiye'nin elektrik enerjisi sektör raporu incelenmiş ve mevcut durum, 5 ile 10 yıllık öngörüler hakkında bilgiler verilmiştir. Bununla birlikte senkron generatörlerle ilgili bilgiler sunulmuştur. Senkronizasyon cihazı olarak Woodward/SPMD10/YB rölesi seçilmiştir. Cihazın özellikleri, bağlantı şemaları, avantajları hakkında bilgiler verilmiştir. Cihaz senkron modunda ve ölü bara modunda nasıl çalıştırılacağı hakkında bilgiler verilmiştir.

## **4. ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE SİSTEM VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Ülkemizde elektrik enerjisinin daha verimli kullanılmasına yönelik çalışmalar ve araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Elektrik üretim santrallerinde elektrik enerjisi üretmek için iç ihtiyaca binaen elektrik enerjisini tüketmek gerekir. Gerek termik santrallerde ve gerekse bunun dışındaki elektrik üretim santrallerinde ünitelerin iç ihtiyaçlarında harcanan elektrik enerjisi; enerji üretim maliyetini olumsuz olarak doğrudan etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Bu nedenle santrallerin iç ihtiyaçlarında harcanan elektrik enerjisi için yapılacak enerji verimliliği ve tasarrufu çalışmaları da enerji üretim maliyetini düşürecek parametrelerden biridir. Bu çalışmada; birçok alanda uygulanabilecek enerji verimliliği elektriksel olarak ele alınmış olup, elektrik üretim santrallerinde elektrik enerjisi verimliliğinin artırılması için gerekli olan yöntemler açıklanmıştır. Bununla birlikte elektrik üretim santrallerinde enerji verimliliğinin artırılması için son yılların önemli araştırma konularından biri olan superiletkenlik konusu da işlenecektir. [27]

### **4.1 Elektrik Üretim Santral Türleri ve Verimlilikleri**

#### **4.1.1 Fosil yakıtlı santraller (termik santraller)**

Fosil yakıtlı santraller, kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtların yakılmasıyla elektrik üretir. Bu santrallerin verimliliği genellikle %33 ile %60 arasında değişir.

##### **4.1.1.1 Kömür ve linyit yakıtlı santraller**

Termik santral sınıfında değerlendirilen Kömür ve Linyit yakıtlı santraller, ana ekipmanı buhar gücüyle çalışan elektrik üretim santralıdır. Isı kazanlarında ısıtılan su, buhara dönüştürülerek buhar türbininin döndürülmesini sağlar. Dönen buhar türbini elektrik üretici olan generatörü döndürmek suretiyle elektriğin üretilmesini sağlar. Türbinden geçen buhar rankine çevrimi denilen yöntemle bir yüzey yoğunlaştırıcıda (condenser) yoğunlaştırılarak tekrar suya dönüştürülür.

Yoğunlaştırıcıda buharın su haline gelmesi tam olarak sağlanamaz ise soğutma kuleleri ve ilave suğutucular vasıtasıyla suyun hedeflenen ısı derecesine indirilmesi sağlanır.

Kömür yakıtlı santraller, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarından biridir. Tipik bir kömür santralının verimliliği yaklaşık %33-%40 civarındadır. Gelişmiş teknolojiye sahip yeni nesil kömür santrallerinde bu oran %45'e kadar çıkabilir.

#### **4.1.1.2 Doğalgaz santralleri**

Doğalgaz santralleri, Kömür santrallerinde olduğu gibi termik santral sınıfında yer almaktadır. Kömür yakıtlı santrallerden en temel farkı suyun buhar haline getirilmesi için kömür yerine doğalgaz kullanılmaktadır. Doğalgaz santralleri, kömür santrallerine göre daha yüksek verimlilik oranına sahiptir. Bu santrallerin verimliliği, kombine çevrim teknolojisi kullanılarak %50-%60 arasında değişir. Modern doğalgaz santrallerinde bu oran %60'ın üzerine çıkabilir.

#### **4.1.1.3 Petrol santralleri**

Petrol santralleri yakıt olarak petrol kaynakları ve türevlerini kullanmaktadır. Basit çevrim santralı olarak da nitelendirilen petrol santralleri, genellikle yedek enerji kaynağı olarak kullanılır ve verimlilikleri %33-%38 arasında değişir. Petrolün maliyeti ve çevresel etkileri nedeniyle, bu tür santraller genellikle az tercih edilir. Irak, Suudi Arabistan gibi petrol rezervi bakımından zengin olan ülkeler bu tür enerji üretim santrallerini inşa etmektedirler. [27]

### **4.1.2 Yenilenebilir enerji santralleri**

#### **4.1.2.1 Güneş (solar) enerji santralleri**

Yenilenebilir enerji santralleri, doğanın kendini sürekli yenileyen kaynaklarını kullanır. Bu santrallerin verimliliği, kaynakların doğasına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişir.

Güneş enerji santrallerinde, fotovoltaik paneller veya güneş termal sistemleri kullanılır. Güneş ışınlarının panel yüzeyine düşmesiyle elektrik enerjisi üreten solar panellerin verimliliklerinin artması nedeni ile dünya genelinde bu santralın kurulu gücünde artış olmuştur. Bununla birlikte güneş enerji santrallerinin fosil yakıtlı

santrallere göre çevreye verdikleri zarar yok denecek kadar azdır. Fotovoltaik panellerin verimliliği %15-%20 arasındadır. Gelişmiş teknolojilerle bu oran %25'e kadar çıkabilir.

Güneş termal santral olarak da adlandırılan yoğunlaştırılmış termal güneş enerjisi santralleri yenilenebilir elektrik enerjisi kaynağı olarak ele alınmaktadır. Güneş termal santral sistemleri aynalar ve bu aynalarla eşgüdümlü güneşi izleme sistemleri vasıtasıyla geniş bir alana düşen güneş ışınlarını tek bir küçük alanda toplarlar. Yoğunlaştırılmış olan gün ışığının sıcaklığı yüksektir. Elde edilen bu ısı enerji santrallerine gereken ısıyı üretmekte kullanılır. Güneş termal santrallerinin verimliliği ise %30-%40 arasındadır.

#### **4.1.2.2 Rüzgar enerjisi**

Güneş dünya yüzeyini ısıtırken, yerkürenin atmosferinde farklı ısı bölgeleri oluşturmaktadır. Atmosferdeki farklı ısı bölgeleri arasında hava akımları oluşmaktadır. Hava akımlarının sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemler rüzgar enerji sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemin ana ekipmanı olarak rüzgar türbini yer almaktadır. Rüzgar türbini rüzgar enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmede kullanılır. Rüzgarın etkisiyle dönmeye başlayan türbin pervaneleri, oluşan dönme momentini türbin mili üzerinden generatöre aktarır. Generatör ise dönme hareketini elektrik enerjisine dönüştürerek şebekeye elektrik enerjisi sağlar.

Rüzgar türbinlerinin verimliliği, rüzgar hızına ve türbin teknolojisine bağlı olarak %35-%45 arasında değişir. En verimli rüzgar türbinleri %50'ye kadar enerji dönüşümü sağlayabilir.

#### **4.1.2.3 Hidroelektrik santraller**

Hidroelektrik güç santraller, suyun kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesiyle elektrik enerjisi üreten tesislerdir. Bu tür santraller, türbin aracılığı ile suyun potansiyel enerjisini mekanik enerjiye çevirir ve Generatör yardımıyla elektrik enerjisi üretilir. Hidroelektrik santraller, temiz ve yenilenebilir olması nedeniyle sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Ayrıca, bu tür santraller enerji talebine hızlı bir yanıt verme kapasitesine sahiptirler, Ancak, çevresel etkiler ve su ekosistemine olan olumsuz etkileri nedeniyle bazı eleştirilere

maruz kalmaktadırlar. Bu santrallerin verimliliği %85-%90 oranında olup, oldukça yüksek seviyelerdedir.

#### **4.1.2.4 Biyokütle santralleri**

Gıda atıkları ve hayvansal gübreler gibi organik atıkların anaerobik ortam şartlarında çürütülmesi ile oluşan yanıcı metan ( $CH_4$ ) ve karbondioksit ( $CO_2$ ) gazlarının elektrik üretiminde kullanılmasıdır.

Bununla birlikte ayçiçeği, hintyağı, soya fasulyesi gibi tarımsal ürünlerden elde edilen biyodizel yakıtının buhar kazanlarında yakılması sonucunda buhar elde edilir. Buhar türbini ve generatör vasıtasıyla elektrik enerjisi üretilmektedir.

Biyokütle santraller, atmosferin karbon döngüsünde yer alması nedeni ile çevresel zararları, fosil yakıtlı santrallere göre çok azdır. Yakıt olarak kullanılan biyokütlenin sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesi, çevresel etkilerini azaltmada kritik öneme sahiptir. Bu santrallerin verimliliği ise %20-%30 arasında değişir. [27]

#### **4.1.3 Nükleer enerji santralleri**

Nükleer enerji, atom çekirdeklerinin kimyasal reaksiyonlar aracılığı ile açığa çıkan enerji türüdür. Bu reaksiyonlar atom çekirdeklerinin birleşmesi (füzyon) veya parçalanması (filyon) şeklinde gerçekleşmektedir. Füzyon reaksiyonu hafif atom çekirdeklerinin birleşmesi şeklinde olmasına karşın, filyon ise ağır atom çekirdeklerinin bölünmesi şeklindedir. Günümüzde füzyon enerji üretiminde kullanılabilse de enerji üretiminde kullanılmamaktadır. Diğer birincil enerji kaynaklarına göre birim enerji başına enerji üretme kapasitesi daha yüksek olmasına karşın, ciddi güvenlik riskleri ve olumsuz çevresel etkiler taşıyan enerji türü olma özelliği taşımaktadır.

Nükleer güç santrallerin çalışma yöntemi, atom çekirdeklerinde oluşturulan nükleer filyon reaksiyonları ile ısı üretmeye dayanmaktadır. Meydana gelen bu ısı, santaraldeki kapalı çevrimdeki suyu kaynatarak suyu buhar haline getirir. Yüksek basınca sahip buhar, buhar türbinlerinin kanatlarına çarparak türbini döndürür. Oluşan dönme momenti türbin mili üzerinden generatöre iletilerek elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Nükleer reaksiyonun oluşması, nükleer reaktördeki uranyum-235 (U-235) veya plütonyum-239 (Pu-239) gibi radyoaktif elementlerin parçalanması şeklinde

olur ve bu parçalanma sırasında büyük miktarda ısı enerjisi açığa çıkar. Reaksiyon sırasında nükleer reaktörlerde, reaksiyonlar zincirleme şekilde devam ederken daha fazla enerji açığa çıkmasına sebep olur. Zincirleme reaksiyonların devam etmesiyle birlikte reaktörün sıcaklığı artar ve enerji üretimi hızlanır. Sıcaklık artışını kontrol etmek için nükleer reaksiyon hızını kontrol etmek gerekmektedir. Bunun için reaktörde bulunan kontrol çubuklarının devreye alınmasıyla ve açığa çıkan fazla nötronların emilmesi suretiyle ısı artışı denetlenir.

Bir nükleer santral 3 ana bölümden oluşur. Bu ana bölümler reaktör, buhar generatörü ve türbindir. Reaktörde nükleer reaksiyonlar meydana gelir, burada sıcak gaz veya ısı üretilmektedir. Üretilen ısı buhar enerjilerine iletilir ve burada su ısıtılarak yüksek basınçlı buhar oluşturulur. Yüksek basınçlı buhar, türbinlerin kanatlarına çarptırılarak türbin döndürülür. Kapalı çevrim buhar santrallerinde olduğu gibi türbin mili üzerinden generatöre iletilerek elektrik üretimi sağlanır. Nükleer santrallerin verimliliği %33-%37 oranları arasındadır. Ancak, gelişmiş reaktör teknolojileriyle bu oran %40'ın üzerine çıkabilmektedir. [31] [27]

#### **4.1.4 Üretim verimliliklerinin karşılaştırılması ve kayıplar**

Elektrik üretim santrallerinin verimliliği, kullanılan teknolojilere ve yakıtlara bağlı olarak büyük ölçüde değişir.

Farklı türlerdeki santrallerin verimliliklerinin karşılaştırılması:

- Kömür Santralleri: %33-%40
- Doğalgaz Santralleri: %50-%60
- Petrol Santralleri: %33-%38
- Güneş Enerjisi Santralleri: %15-%25
- Rüzgar Enerjisi Santralleri: %35-%50
- Hidroelektrik Santraller: %85-%90
- Biyokütle Santralleri: %20-%30
- Nükleer Enerji Santralleri: %33-%40

Üretim verimliliklerinin yanında kapasite kullanım oranları da önem arzeder. Elektrik enerjisinin depo edilememesi nedeniyle üretim verimliliği kapasite kullanım

oranıyla birlikte incelenmelidir. Örneğin, Nükleer santrallerin kapasite faktörü, başka bir deyişle yıl boyunca mümkün olan maksimum üretimin yüzdesi çok yüksek olup, bazen %90'ın üzerinde seyredebilir. Kapasite kullanım faktörü, santralin yıl boyunca ne kadar sürekli ve güvenilir bir şekilde çalıştığını gösterir. Diğer enerji santralleriyle karşılaştırıldığında, nükleer santrallerin kapasite faktörü oldukça yüksek olmasına karşın yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş ve rüzgar santrallerinde kapasite kullanım faktörü genellikle %20 - %35 oranları arasındadır.

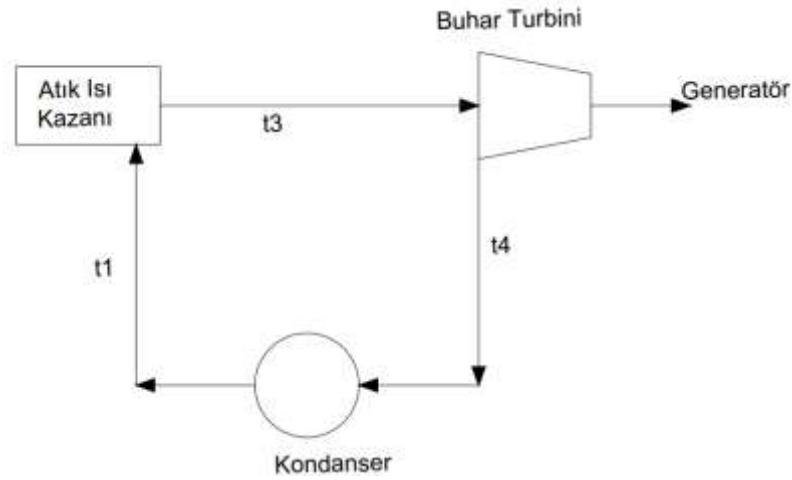
**Çizelge 4.1: Santral Türlerinin Verim ve Kapasite Faktörü Karşılaştırması [27]**

<b>Santral Türü</b>	<b>Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)</b>	<b>Kapasite Faktörü (%)</b>
Kömür Santralleri	<b>33-40</b>	<b>70-80</b>
Doğalgaz Santralleri	<b>50-60</b>	<b>50-60</b>
Petrol Santralleri	<b>33-38</b>	<b>10-20</b>
Güneş Enerjisi Santralleri	<b>15-25</b>	<b>15-25</b>
Rüzgâr Enerjisi Santralleri	<b>35-50</b>	<b>30-40</b>
Hidroelektrik Santraller	<b>85-90</b>	<b>30-60</b>
Biyokütle Santralleri	<b>23-30</b>	<b>50-80</b>
Nükleer Enerji Santralleri	<b>33-37</b>	<b>90-95</b>

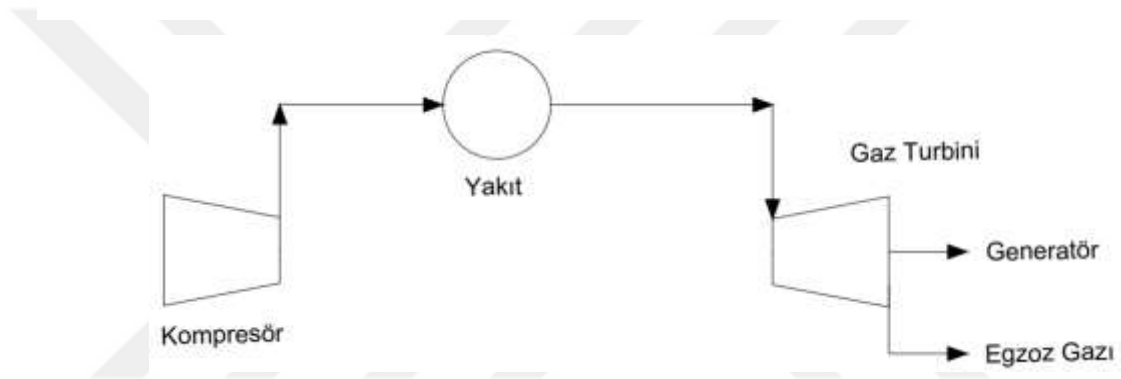
Elektrik üretimi yapılan santrallerde verimin artırılabilmesi için kayıpların azaltılması gerekmektedir. Bu kayıplar mekanik kayıplar, elektriksel kayıplar ve gerçekte varlığı tespit edilmesine rağmen tanımlanamayan kayıplar olarak sınıflandırılabilir.

#### **4.1.4.1 Mekanik kayıplar ve verim**

Elektrik Enerjisinin üretimi için bir Buhar Türbin Santrali ile ilgili Rankine Çevrimi şekil 4.1 de, Gaz Türbin Santralında Brayton Çevrimi Şekil 4.2 de gösterilmektedir. Mekanik kayıpların azaltılması için her iki çevrimdeki mekanik ekipmanların kayıplarının azaltılması gerekmektedir.



**Şekil 4.1: Buhar Türbin Santralinde Rankine Çevrimi [27]**



**Şekil 4.2: Gaz Türbin Santralinde Brayton Çevrimi [27]**

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 deki her iki çevrimden de görüldüğü gibi, mekanik olarak santral veriminin artırılabilmesi temel olarak çevrim üzerinde bulunan proses ekipmanlarının verimlerinin yükseltilmesine bağlıdır. Türbin veriminin artırılması ise türbin imalat şekline bağlıdır. Özellikle Gaz türbini için yüksek sıcaklık dayanımlı türbinlerin verimi daha fazladır.

Gaz türbininde yakıtı yanma odasına göndermeden önce yanma sıcaklığına yakın değerde ısıtılması verimin artırılması için önemlidir.

Santralin kurulduğu ortam sıcaklığı ve denizden yükseklik de verim üzerinde kayda değer etki etmektedir. Örnek olarak 1000 metre yükseklikteki bir santralin, deniz seviyesinde kurulan bir santrale göre türbin verimi en az %20 azalmaktadır.

Borularda ve ekipmanlarda ısı yalıtımı toplam verimi etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Her ne kadar ısı kaybının önlenmesine çalışılsa da, ısı geri kazanım sistemleri sayesinde kalan ısı, tesis veya şehrin bir kısmının ısıtılması

maksadıyla kullanılması verimin düşmemesi için önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Aynı şekilde güneş enerji santrallerinde tesisin sıcaklığın düşük olduğu yerde kurulması verimi pozitif olarak etkilemekle birlikte, gölgelemenin engellenmesi kritik önemdedir. PV panellerin tam ve doğru olarak güneşe 90 derece ile yönlendirilmesi önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hidroelektrik santrallerinde rezervuar suyunun buharlaşmaması için minimum su seviye sınırı dikkate alınarak, baraj suyu üzerine Güneş enerji santrali (GES) yapılması verimi artırıcı önemli bir yöntem olarak uygulanmaktadır. Bu uygulama, bir taraftan rezervuar suyunun buharlaşmasını engellediği ve tesisin elektrik üretiminin sürekliliğini sağladığı gibi diğer taraftan ortam ısisının düşmesi ile güneş enerji santralının verimini artırmaktadır.

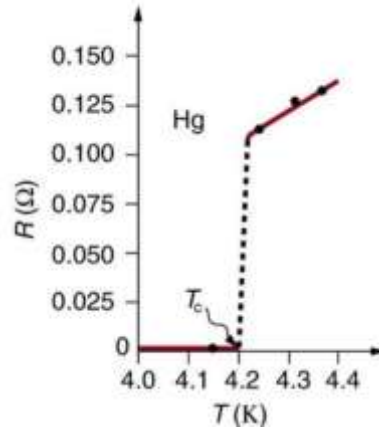
#### **4.1.4.2 Elektriksel kayıplar ve verim**

- Yüksek verimli Motorların kullanılması,
- Generatör rotor sargı ve bileziklerinde ve stator sargılarında meydana gelen elektriksel kayıpların azaltılması,
- Proses gerekliliğine bağlı olarak motorların sürülmesi için hız kontrol cihazlarının kullanılması,
- Elektrik kontrol ve kumanda odalarında sıcaklığın 21-23 derece arasında tutulması ve bu odaların ısı izolasyonlarının yapılması,
- Reaktif gücün generatör ve iletimde güç kaybına yol açmaması için kompanzasyon sistemlerinin yüke yakın yere tesis edilmesi,
- Tesiste aydınlatma sisteminin kontrolü için aydınlatma otomasyonunun kurulması verim artırıcı uygulamalardan biridir.
- Hidroelektrik santrallerinde rezervuar suyunun üzerine yüzer GES inşaa etmek de verimliliği artırıcı faktörlerden biridir.
- Bu çalışmada son olarak, elektrik üretim santrallerinde verimliliği artıran ve son yıllarda en önemli araştırma konularından biri olan süperiletkenlik ilgili konular aşağıda açıklanmaktadır. [27]

## 4.2 Süperiletkenlik ve Verim

İlk keşfedildiği günden günümüze gelene kadar süperiletkenlik konusunda birçok çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar artan hızla devam etmektedir. Süperiletken malzemelerin geniş uygulama alanları bulunmaktadır. Süperiletken malzemelerin enerji üretim ve iletim sistemlerinde kullanılmasının temiz enerji elde etmeye ve kullanmaya olan katkısı inkâr edilemez durumdadır. Ayrıca bu malzemeler güç sistemlerinde kullanıldıklarında sisteme sağladıkları olumlu katkılar asla göz ardı edilemez. Süperiletken malzemelerin iletim hatları, generatör ve transformatörlerde kullanılması enerji verimliliğini kayda değer bir oranda artırmaktadır.

Dünyanın ilk süperiletken malzeme ile tanışması 8 Nisan 1911 yılında olmuştur. Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes ve çalışma ekibi tarafından Hollanda'nın güney eyaletine bağlı Lieden şehrinde keşfedilmiştir [21]. Onnes süperiletken malzeme üzerine yaptığı çalışmaların sonucunda civa elementinin sıvı heliumu kullanarak 4,2 kelvine kadar soğutulması durumunda elektriksel direncinin sıfıra yaklaştığını görmüştür. Onnes elde ettiği bu buluşla dünyayı süperiletkenlik kavramı ile tanıştırmış ve 1913 yılında bu buluşu ile Nobel fizik ödülü almıştır. [28]



Şekil 4.3: Civa (Hg) Elementinin Sıcaklık-Direnç Değişim Grafiği [28]

Civa elementinin sıcaklığa göre direnç değişimi grafiği şekil 4.3 de gösterilmektedir. Ortam sıcaklığının 4,2 Kelvine (T<sub>c</sub>) düşürülmesi ile civa (Hg) elementinin direnci sıfıra düşmektedir.

Civa elementinin dışında bir çok elementin süperiletken özelliklere sahip olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Çizelge 4.2 de süperiletken bazı elementler ve bileşiklerin süperiletkenlik sıcaklıkları verilmiştir.

**Çizelge 4.2: Bazı Süperiletken Element / Bileşikler ve Kritik Sıcaklıkları [28]**

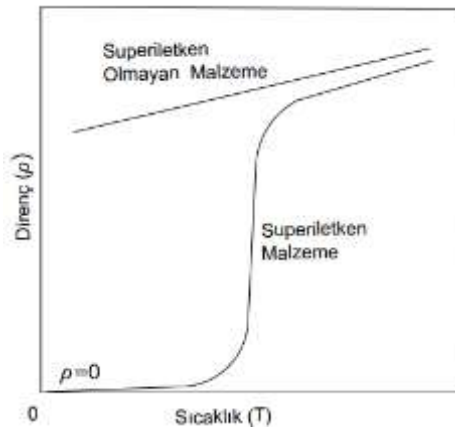
Element / Alaşım	T <sub>C</sub> (K)
In (Indiyum)	3,40
Hg (Civa)	4,015
Nb <sub>3</sub> Al ( niobiyum aluminide)	17,5
NbTi (niobiyum titanium)	10

### 4.3.1 Süperiletkenlerin temel özellikleri

Süperiletkenlik; bazı malzemelerin karakteristik kritik sıcaklık şartları altında soğutulduklarında elektriksel dirençlerinin sıfır veya sıfıra yakın olması ve üzerlerine uygulanan manyetik alanı tamamen dışlaması olarak ifade edilebilir. Her süperiletken özelliğe sahip malzemenin kendisine ait bir kritik sıcaklığı, kritik manyetik alanı ve kritik akım yoğunluğu vardır. Eğer süperiletken malzeme ilgili kritik sıcaklık, kritik manyetik alan ve kritik akım yoğunluğu değerlerinden herhangi birinde fazlasına maruz bırakılırsa malzeme normal faz evresine geçerek süperiletkenliği bozular. Aynı zamanda kritik manyetik alan da süperiletken malzemenin sıcaklığına bağlıdır.

Süperiletkenlerin en önemli iki temel özelliği mevcuttur:

- Doğru akıma maruz bırakıldıklarında sıfır ya da sıfıra çok yakın direnç özelliğine sahip olurlar, alternatif akımda ise bazı kayıplar mevcuttur.
- Mükemmel dimanyetik özelliğe sahip olurlar.



**Şekil 4.4: Süperiletken Malzemenin R-T grafiği [28]**

Şekil 4.4 de görüldüğü üzere, malzemenin maruz bırakıldığı sıcaklık azaltıldıkça malzemenin öz direnci azalmakta ve sıcaklık T<sub>c</sub> değerine geldiğinde  $r=0$  veya sıfıra çok yakın olmaktadır. Bu durumda manyetik alınganlık  $c = -1$  olmaktadır.

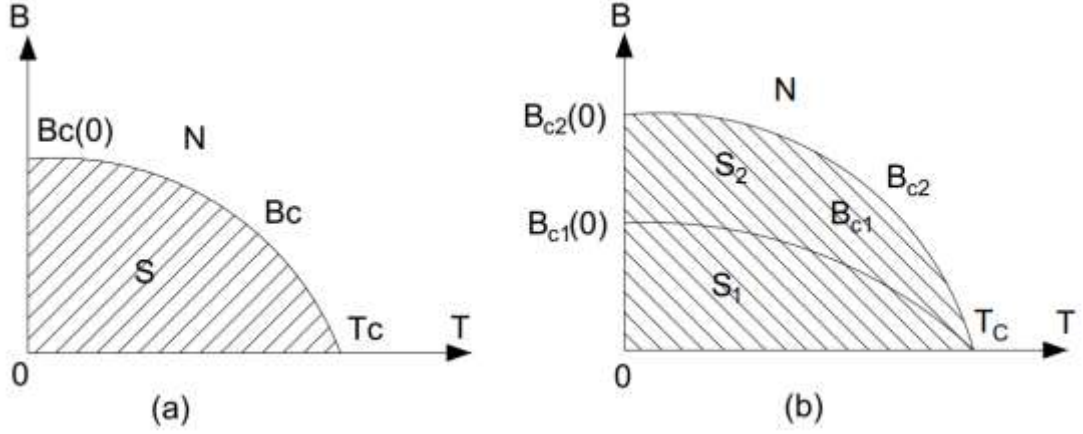
Manyetik alınganlık değerinin (-1) olması malzemenin mükemmel dimanyetik özellikte olduğunun göstergesi anlamına gelir. Bu şartlar altında süperiletken malzeme üzerine uygulanan tüm manyetik alanı dışlamaktadır. Manyetik alanın dışlanması olayına “**Meissner Etkisi**” denir. Üzerine uygulanan manyetik alan belirli bir kritik değere ( $H_c$ ) ulaştığında ise meissner etkisi yok olur ve akı malzemenin içine nüfuz etmeye başlar. Uygulanan manyetik alanın artmasıyla malzemenin verdiği tepkiye göre süperiletkenler iki sınıfa ayrılır. [28]

I. Tip Süperiletkenler: Malzeme üzerine uygulanan belirli bir manyetik alandan sonra Meissner etkisinden kurtulup normal duruma geçer ve manyetik alanın kendi içine nüfuz etmesine müsaade etmektedir.

**Çizelge 4.3: 1. Tip Süperiletkenlerin Kritik Sıcaklık ve Kritik Manyetik Alan Değerleri [30]**

<b>1. Tip Süperiletkenler</b>	<b><math>T_c</math> (K)</b>	<b><math>H_{c(0)}</math> (T)</b>
Alüminyum (Al)	1,196	0,0105
Kalay (Sn)	3,722	0,0305
Kurşun (Pb)	7,193	0,0803
Civa (Hg)	4,153	0,041
Niyobyum (Nb)	9,26	0,1991
Galyum (Ga)	1,083	0,0058
İndiyum (In)	3,408	0,0281
Tantal (Ta)	4,47	0,0829

II. Tip Süperiletkenler: Kritik manyetik alan kritik değerleri 3 kısma ayrılır ( $H_{c0}$ ,  $H_{c1}$ ,  $H_{c2}$ ). Bu tip malzemelerde  $H_{c0}$  ile  $H_{c1}$  olarak adlandırılan alt kritik manyetik alan değerine kadar malzeme I. Tip malzeme ile aynı özelliği gösterir. Akı bünyesine nüfuz etmez.  $H_{c1}$  değerinden  $H_{c2}$  değerine kadar ise kısmi akı nüfuzu söz konusudur. Fakat süperiletkenlik devam etmektedir.  $H_{c2}$  değerinden sonra ise malzeme normal faza dönüş yaparak süperiletken özelliğini kaybetmektedir.



Şekil 4.5: Süper İletkenlerin Faz Diagramları (a) I. Tip; (b) II. Tip Süperiletkenler [30]

Çizelge 4.4: 2. Tip Süper İletkenlerin Kritik Sıcaklık ve Kritik Manyetik Alan Değerleri [30]

2. Tip Süperiletkenler	$T_C$ (K)	$H_{C2}$ (T)
$Nb_3Al$	18,7	32,4
$Nb_3Ge$	23,2	38
$NbN$	15,7	15,3
$NbTi$	9,3	15
$Nb_3(AlGe)$	21	44
$PbMoS$	14,4	60
$LaSrCuO$	36	32
$YBaCuO$	92	120
$BiSrCaCuO$	125	89
$HgBaCaCuO$	135	190

#### 4.3.2 Süperiletkenlerin uygulama alanları

Süperiletken malzemeler Yüksek Sıcaklık Süperiletkenlerin (YSS) keşfedilmesiyle birlikte bir çok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalardan en önemlisi güç sistemleri alanıdır. Elektrik Enerjisinin üretilmesi ve dağıtılması olarak adlandırılan güç sistemleri sürekli olarak kısa devre sorunları, üretim ve iletim hatlarının aşırı yüklenmesine ilişkin problemler, hatlardaki gerilimin çökmesi (voltage collapse) ve yüksek kayıplar gibi birçok problemle karşı karşıya

kalmaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletkenler, (YSS) sahip oldukları sıfır direnç ve mükemmel dimanyetik özellikleriyle elektrik güç sistemlerinde yukarıda ifade edilen bu sorunları en aza indirmek için birçok alanda kendine uygulama alanı bulmuştur.

#### **4.3.3 Süperiletken kablolar**

Süperiletken iletim kabloları doğru akımda kayıpsız, alternatif akımda ise çok düşük kayıplara sahip olması nedeniyle enerji kaybını önlemede önemli avantajlar sağlarlar. Aynı boyuttaki süperiletken kablolar, normal iletkenlere göre 2 ila 10 kat arasında akım taşıyabilme özelliğine sahip olurlar. Soğutma işlemine tabii tutulan enerji iletim kabloları yeraltında tesis edilirler. Enerji kaybının olmaması doğaya karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımını azaltarak, kabloların çevreye olumsuz etkilemesinin önüne geçilmektedir. Direncin sıfır ya da sıfıra çok yakın olması nedeniyle ısınmanın olmaması iletilen enerjideki verimin artmasına da katkıda bulunmaktadır.

#### **4.3.4 Arıza akım sınırlandırma (FCL)**

Süperiletken malzemelerin şekil 4.4 de de görüldüğü üzere kendi karakteristikleri (normal ve süperiletken durumu) kullanılarak elektrik güç sistemlerinde yaşanması muhtemel kısa devre akımlarını kısa sürede sınırlandırmayı sağlayan cihazların yapısında kullanılır. Rezistif tip veya endüktif tip gibi birçok çeşidi mevcuttur. Bu süperiletken cihazların kullanılması ile sistemde oluşacak kısa devrenin, devre kesiciler açılana kadar kısa devre akımını belirli bir seviyede tutulması hedeflenmektedir. Kısa devre durumu ortadan kalktıktan sonra sistem dış müdahale gerektirmeden normal işletme durumlarına dönebilmektedirler.

#### **4.3.5 Süperiletken manyetik enerji depolama (SMES)**

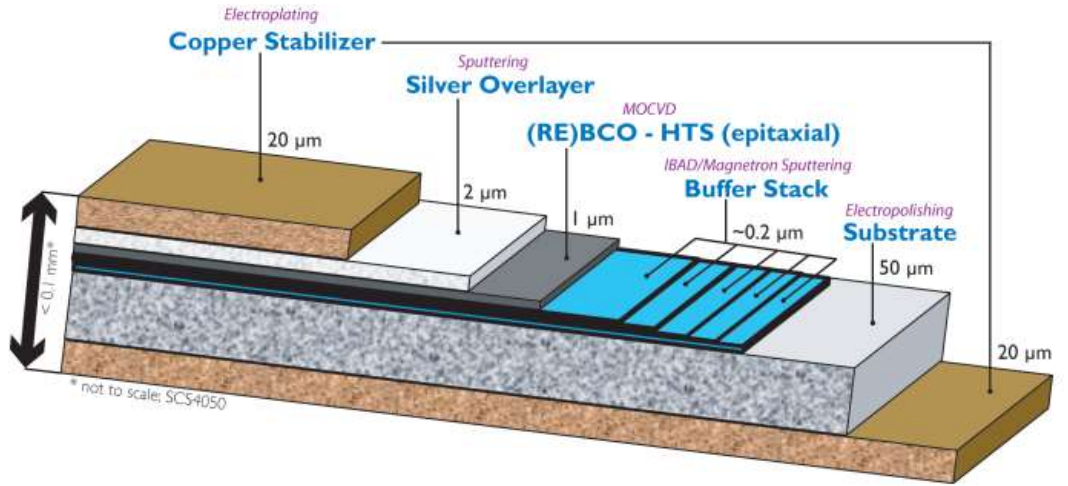
Süper iletken malzemelerin doğru akımda kayıpları yoktur. İçinde akımı kayıpsız olarak depolayabilen süperiletken tellerden sarılmış bir bobin mevcut olup, bir çeşit FACTS (Flexible AC Transmission Systems) cihazıdır. Sisteme paralel bağlanarak, anlık olarak sistemde oluşan fazla enerjiyi depolayan ve ihtiyaç olması durumunda sisteme geri enjekte ederek tüketiciye kesintisiz ve sabit frekansta gerilim sağlamakta kullanılmaktadır. [28]

### 4.3.6 Süperiletken generatörler

Süperiletken malzemelerden üretilen iletkenlerin normal iletkenlere nispeten daha fazla akım iletebilme özelliklerinden dolayı süperiletken malzemelerden üretilen motor ve generatörler boyut olarak küçülmektedir. Bununla birlikte iletken kayıpları azaldığından verimleri de yüksektir. [28]

Temiz ve daha az kirli olması nedeniyle Rüzgar Enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Daha verimli rüzgar türbinlerini keşfetmek, bilim insanlarının çalışmalarının yoğunlaştığı alanlardan biridir. Geleneksel rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında, süperiletken rüzgar türbini generatörleri sifra yakın direnç değerine, daha küçük boyuta ve daha hafif ağırlığa sahip olması gibi avantajlara sahiptir. Bu avantajları nedeniyle süperiletken rüzgar türbin generatörleri, araştırmacıların ve üreticilerin bu alanda ilgi odağı haline gelmiş bulunmaktadır.

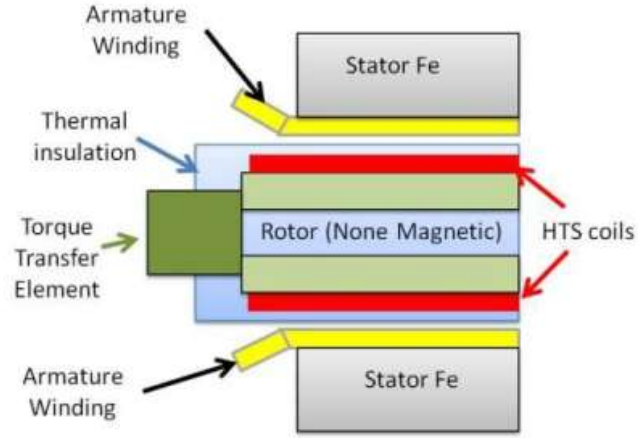
Generatör için kullanılan YTS kaplamalı iletkenler şekil 4.6 da gösterildiği gibi bir alt tabak üzerine yerleştirilen ve bakır gibi dengeleyici metalle kaplanan ince bir süperiletken malzeme olan  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) (itrium barium bakır oksit) tabakasından oluşan katmanlı kompozitlerden yapılmaktadır. Kaplamalı bu iletkenler yaklaşık %1 kadar YBCO içermektedir [34].



Şekil 4.6: YSS Kaplamalı Bir İletkenin Yapısı [34]

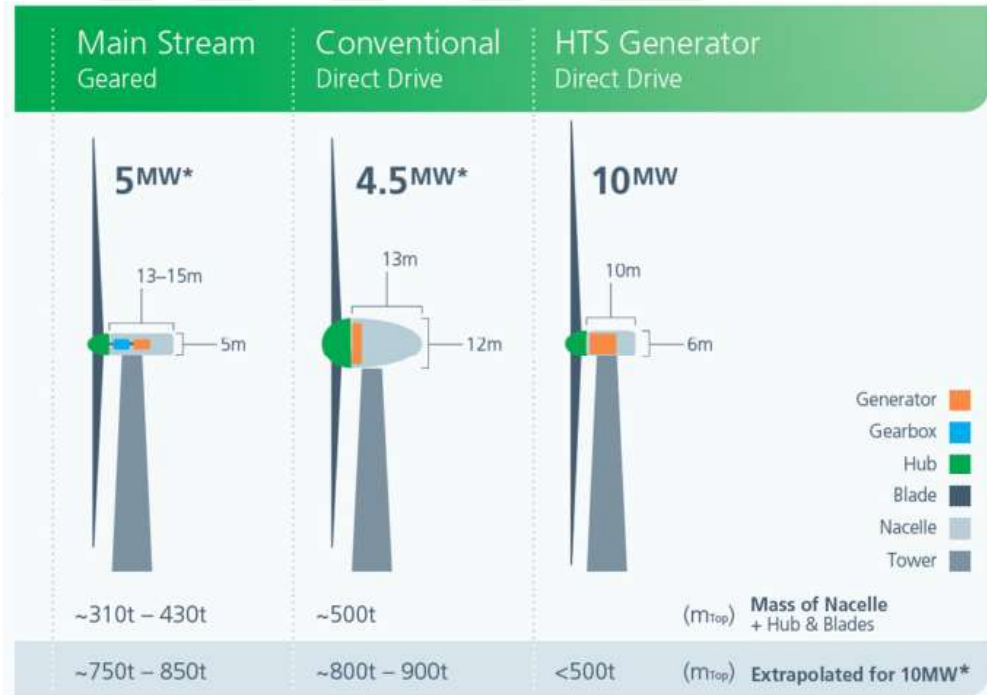
En yaygın süperiletken rüzgar türbin generatörü, alan sargılı süperiletken generatördür. Burada, iki süperiletken rüzgar türbini generatörü konsepti önerilmektedir. Birincisi, yalnızca rotor sargılarının süperiletken olmasıdır. İkincisi ise hem alan sargılarının hem de stator sargılarının süperiletken olduğu durumdur.

Şekil 4.7 de rotor sargısının süperiletken, stator sargısının bakır iletken olduğu generatörün aksenal kesiti gösterilmektedir. [33]



**Şekil 4.7: Süperiletken Senkron Makinenin Aksenal Kesiti [33]**

Çeşitli rüzgar türbin tasarımlarının elektriksel güç, boyut ve ağırlık karşılaştırması şekil 4.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.8: Çeşitli Rüzgar Türbin Tasarımlarının Karşılaştırması [34]**

### 4.3.7 Süperiletken transformatörler

Normal güç transformatörlerine göre daha küçük boyutta ve ağırlıktadırlar. Soğutma işlemi yağ yerine sıvı azotla yapıldığından çevreye zarar verilmemektedir. [28] Sıvı nitrojenle soğutulan yüksek akım yoğunluklu, Yüksek Sıcaklık

Süperiletken (HTS) tel kullanılan süperiletken transformatörler, geleneksel güç transformatörlerinden daha hafif ve daha verimli olmaktadır.

Bilim de ise yüksek enerji fiziği, Radyo frekans (RF) mıknatısları yapımında da kullanılmaktadır.

Sera gazının sınırlandırılmasını amaçlayan ve uluslararası bir anlaşma olan Kyoto Protokolü atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun iklime tehlikeli etki yapmayacak şekilde dengede kalmasını teşvik eder. Protokol sera gazı emisyonunun azaltılması amacı doğrultusunda üye ülkelere bir dizi bağlayıcı hükümler getirmiştir. Süperiletken malzemelerin kullanılmasında kayıpların olmaması ve ısının oluşmaması nedeniyle atmosfere salınan sera gazında önemli ölçüde düşüş görülmüştür. Süperiletkenlik şartlarının oluşması için soğutmanın yağ yerine sıvı azot kullanılması, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu azalmaktadır.

Süperiletken malzemeler Elektrik Elektronik, Bilgisayar, Bimedikal ve Makine Mühendisliği uygulama alanlarında kullanıldığı açık bir şekilde görülmektedir. Yakın gelecekte süperiletken teknolojisinin daha fazla kullanılmasının hem güç sistemlerindeki verimliliğin artacağı hem de içinde yaşadığımız doğaya zararın azalacağı görülmektedir.

#### **4.3.8 Diğer uygulamalar**

Süperiletken malzemeler kayıplarının olmaması nedeniyle süperiletken mıknatıs ve bobin uygulamalarında da kullanılmaktadır. Yüksek manyetik alanlardan yararlandığı NMR ve MRI gibi medikal uygulamalarda da verimli şekilde kullanılmaktadır. Bilim de ise yüksek enerji fiziği, Radyo frekans (RF) mıknatısları yapımında da kullanılmaktadır.

Sera gazının sınırlandırılmasını amaçlayan ve uluslararası bir anlaşma olan Kyoto Protokolü atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun iklime tehlikeli etki yapmayacak şekilde dengede kalmasını teşvik eder. Protokol, sera gazı emisyonunun azaltılması amacı doğrultusunda üye ülkelere bir dizi bağlayıcı hükümler getirmiştir. Süperiletken malzemelerin kullanılmasında kayıpların olmaması ve ısının oluşmaması nedeniyle atmosfere salınan sera gazında önemli ölçüde düşüş görülmüştür. Süperiletkenlik şartlarının oluşması için soğutmanın yağ yerine sıvı azot kullanılması, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu azalmaktadır.

Süperiletken malzemeler Elektrik Elektronik, Bilgisayar, Bimedikal ve Makine Mühendisliği uygulama alanlarında kullanıldığı açık bir şekilde görölmektedir. Yakın gelecekte süperiletken teknolojisinin daha fazla kullanılmasının hem güç sistemlerindeki verimliliğin artacağı hem de içinde yaşadığımız doğaya zararın azalacağı görölmektedir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Elektrik Üretim Sistemlerinde Senkronizasyon Sonuç ve Öneriler

Bir ülke ya da şehir için elektrik enerjisinin üretilmesi sürecinde genel olarak çok sayıda santral ve bu santrallerde elektrik enerjisi üreten çok sayıda generatör kullanılır. Bu generatörler tek başlarına küçük güçlü olsalar bile birbirlerine senkron bağlandıklarında çok büyük güçlü tek bir generatör olarak davranmaktadır. Bu şekilde şebekede meydana gelecek arıza veya bakım süreçlerinde enerjinin kalitesi ve sürekliliği garanti altına alınmaktadır.

Bununla birlikte bir elektrik şebekesini besleyen bir santral ve bu santralde birden fazla generatör olması durumunda (Island Mod); Generatörün senkronizasyon şartları, şebekenin talep ettiği yük talebine göre farklılık göstermektedir. Teorik olarak hesap edilebilen bu şartlar ve limit değerler bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu farklılıkların giderilmesi için birçok kez deneme yapılması suretiyle ve teorik bilgiler ışığında çözüm oluşturulması gerekmektedir. Bu testler genellikle yük bankası (Load Cell) kullanılarak yapılmaktadır. Farklı güç değerlerine sahip olan yük bankaları, tesisteki generatör güçleri referans alınarak belirlenmektedir.

Generatörlerin senkronize edilmesi işlemi, yakın geçmişe kadar operatörler tarafından yapılmaktaydı. Oldukça basit ölçüm teknikleri ile operatörler iki sistemin senkron hale gelip gelmediğini ölçüp, senkron olana kadar sisteme bağlanacak generatörü kontrol etmekteydi. İşlem bazen bilgi eksikliği ya da tecrübesizlik ile birleştiğinde, üretilen enerjinin kalite ve sürekliliğinde aksamalara yol açmakta ve üretim tesisinde bir takım mekanik ve elektriksel tahribata neden olmakta ve çok ciddi kayıplar meydana gelmekte idi.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte generatörlerin otomatik senkronizasyonu konusunda da gelişmeler yaşanmıştır. Manuel senkronizasyon yerini sayısal kontrolörler tarafından gerçekleştirilen otomatik senkronizasyona bırakmıştır. Otomatik senkronizasyon şebekede meydana gelen hata ve arızaların sayısını azaltmış ve daha yumuşak ve hassasiyeti yüksek senkronizasyon sağlamıştır.

Ülkemizde hem elektrik üretimi yapan bununla birlikte tüketim de yapan otoprodüktörler mevcuttur. Bu tesislerde çoklu senkronizasyon cihazının kullanılması uygun değildir. Bunun için tek bir senkronizasyon sistemi kurularak, mantıksal algoritmalar ile generatörlerin şebekeye daha kolay senkron olması sağlanmıştır.

Bu çalışmada karmaşık bir elektrik altyapısına sahip bir sistem yerine şehir şebekesini besleyen 3 adet senkron generatör ve 1 adet de ilave dizel generatör (Peak Power Dizel Generatör) ün şebekeye senkronizasyonu senaryosu işlenmiştir. Senkronizasyon işleminin gerçekleşmesi sırasında donanım seçiminde aşağıdaki konulara azami dikkat edilmesi önerilmektedir.

1. Operatörlerin sisteme hakimiyetinin tam olabilmesi endüstriyel haberleşme protokollerine sahip senkronizasyon kontrolörleri ve arayüzü kullanılmalıdır.
2. Senkronizasyon cihazı gelecekte sisteme ilave edilecek eklentilere cevap verebilecek modüllere sahip olmalıdır.
3. Senkronizasyon cihazları arızalara karşı dayanıklı olmalıdır.
4. Senkronizasyon cihazının zengin servis ağına sahip olması ve gerekirse sistemi yedekli olarak çalıştırabilecek bir cihazın seçilmesi tercih edilebilir.
5. Konfigürasyonu için cihaz kolay kullanım arayüz formatına sahip olmalıdır.
6. Cihaz diagnostic (arıza arama) fonksiyonlarına sahip olmalıdır. Sistemde oluşacak arızaların santrale vereceği zararı önlemek için senkronizasyon işlemini sonlandırabilen özelliğe sahip olması gerekmektedir.

## **5.2 Süperiletken Malzemelerin Kullanım Avantajları ve Sonuçlar**

Elektrik üretiminde verimliliği artırmak ve çevresel etkileri azaltmak, sürdürülebilir bir gelecek için hayati öneme sahiptir. Fosil yakıtlı santrallerin çevresel zararlarını azaltmak için enerji verimliliği artırılmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş hızlandırılmalıdır. Türkiye, enerji verimliliği konusunda mevcut politikalarına ilave olarak daha fazla politikalar üretmelidir. Bununla birlikte Ülkemiz, enerji politikalarında yenilenebilir enerji konusunu daha fazla önceliklendirerek, çevresel sürdürülebilirliği ve enerji güvenliğini sağlamayı

hedeflemelidir. Bu hedeflere ulaşmak, Türkiye'nin enerji geleceği için büyük bir adım olacaktır.

Süperiletken malzemelerin kullanılmasının birçok avantajları mevcut olduğu çok iyi bilinmektedir; Direncin sıfır olması nedeniyle ısı kaybı olmadan büyük miktarda enerji taşınabilir, normal iletkenlere nispetle iletkenin kesitinde küçülme olduğu için aynı kesitte daha fazla güç tüketiciye iletilebilir. Sistemde oluşabilecek hatalardan kurtulmak ve sonra hızlı bir şekilde kendilerini düzeltebilme özelliklerine sahiptirler. Süperiletken malzemelerin kullanılmasıyla üretilen generatörlerde birkaç MVA ya kadar 30-40% ve yaklaşık 100MVA ve üzerindeki güçlerde 40-50% oranında kayıplarda azalma olurken, 30-50% oranında ise boyut ve ağırlığında azalma meydana gelir. Transformatörlerde 50% oranında kayıplarda ve 30-50% oranında ise boyut ve ağırlıkta azalma görülmektedir. YSS güç kabloları normal kabloların 2 ila 10 katı kadar akım taşıyabilirler. Kablonun izlediği yol genellikle yeraltında olmasının nedeni, sıcaklığın kontrolü yeraltında daha kolay olmasındandır. Süperiletkenler, akıllı şebekelerde kullanılacak bilgisayar işlemcilerinde hızı arttırarak enerji kaybını da azaltmaktadır.

Dezavantajları ise; Süperiletken malzemeler sadece belirli bir sıcaklığın altında ( $T_c$ ) akımı kayıpsız olarak iletmektedir. Sıcaklığın kontrol edilmesi için katlanılması gereken maliyet göz ardı edilmeyecek derecede yüksektir. Süperiletken kabloların maliyeti normal bakır ve alüminyum kablolarına göre çok daha yüksektir. Süperiletkenler günümüz koşullarında yaygın değildirler. Süperiletken cihaz ve ekipmanların geleneksel ekipmanlar yerine daha fazla kullanılabilmesi için;

- Daha fazla akım taşıyabilen süperiletken kablolar geliştirilmelidir.
- Mevcut süperiletken kablolardaki maliyetlerin azaltılması için çalışmalar yapılmalıdır.
- Süperiletken malzemelerin kullanımının yaygınlaşması için soğutma sistemi maliyetleri azaltılmalıdır.
- Bu yönde çok fazla çalışmalar olmakla birlikte daha yüksek sıcaklıklarda süperiletken özelliğini alabilen yeni malzemelerin keşfedilmesi yönünde araştırmalar yapılmalıdır. [28]

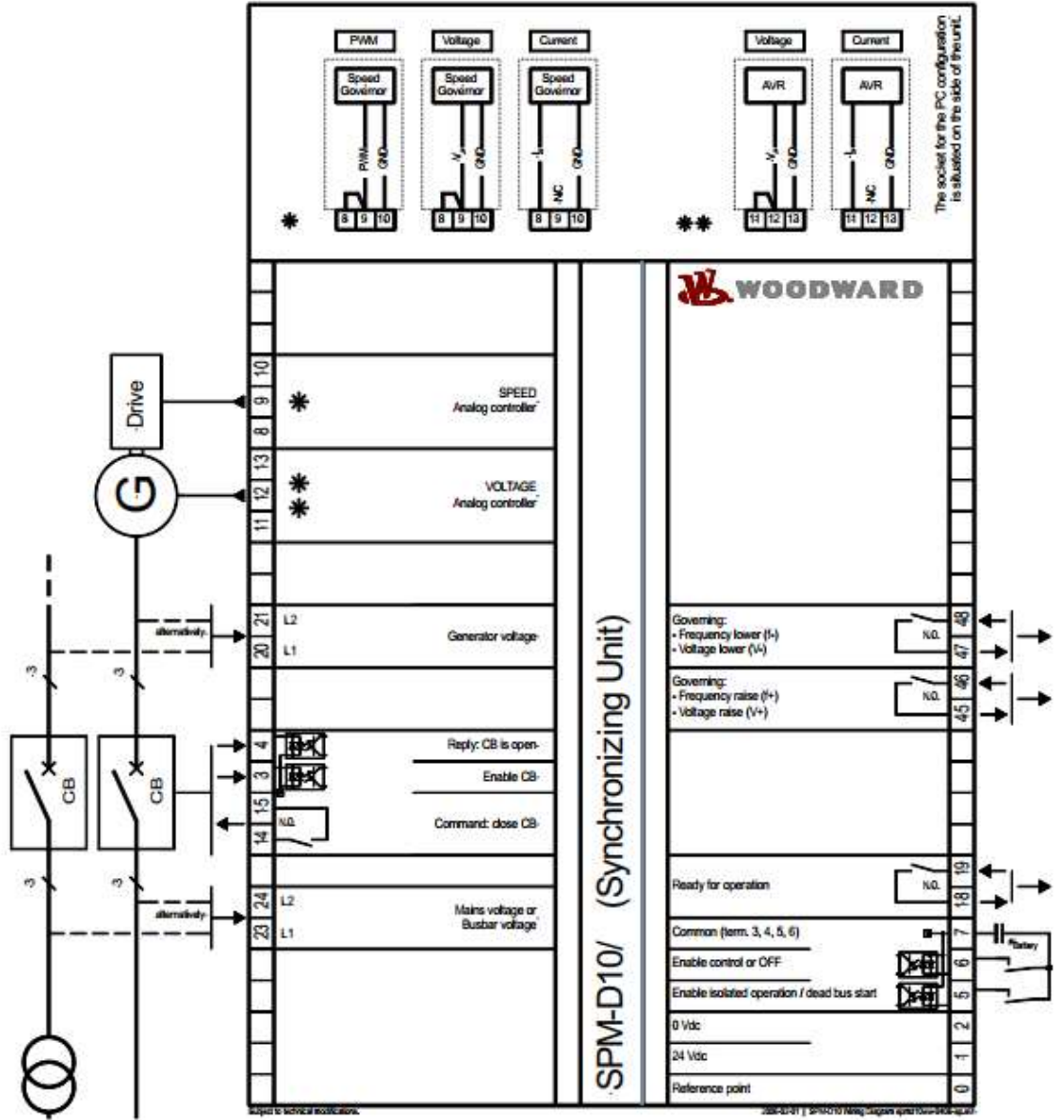
## KAYNAKLAR

- [1.] EPDK (Aralık-2024), “Elektrik Piyasası Sektör Raporu” Ankara, 2024
- [2.] TEİAŞ “Yıllık Değerlendirme Raporları” Ankara 2024
- [3.] T.C., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye Enerji Planı” 2022
- [4.] Evans, R.A., Manual/Automatic Synchronization Circuit for a 37.5- MVA Steam-Turbine-Driven Generatör Industry App., IEEE Transactions, pp 361-364 (1990).
- [5.] Malik, O. P., Hope, G. S., Hancock, G. C., Zhaohu, L., Luqing, Y., Shouping, W. Frequency Measurement For Use With a Microprocessor-Based Water Turbine Governor. Energy Conversion, IEEE Transactions, (1991).
- [6.] Gorecki, K., Szmajada, M., Mroczka, J. Adaptive Digital Synchronization of Measuring Window in Low-Cost DSP Power Quality Measurement Systems. Electrical Power Quality and Utilisation. EPQU. 9th International Conference, Opole University of Technology, Opole, Poland, 2007
- [7.] Guoqiang, H., Renmu, H. The Research On Synchronization Device Based On DSP. Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference, North China Electric Power University, China, 2004
- [8.] Bekiroğlu, E., Bayrak A. (2006). Automatic Synchronization Unit for the Parallel Operation of Synchronous Generatör, EUROCON, 2009
- [9.] Zhang, X. -Y., Dang, C.-L., Jiang, C.-P., Chai, L. (2009). Design of Generatör Synchronizing Device Based on PIC16F877 and FPGA. Intelligent Systems and Applications, sf. 1-3. Synchronizing Systems. Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference,
- [10.] Seeley, N. C., Cameron C., Terry R. (2012) Advances in Generatör Control and Automatic Synchronization - Eliminating The Need For Standalone Synchronization Systems. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC),
- [11.] IEEE Power Engineering Society (2005) IEEE Std C50.12, IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generatör and Generatör/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5MVA and Above,
- [12.] Kurtulan, S. Endüstriyel Kumanda Sistemleri, İstanbul, Nobel Yayın Dağıtım , (2007)
- [13.] HK Onnes, The superconductivity of mercury, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1911.
- [14.] Bardeen, J.; Cooper, L. N.; Schrieffer, J. R., Microscopic Theory of Superconductivity, Physical Review 106 (1): 162–164, April 1957.
- [15.] Noe, M., & Steurer, M., High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. Supercond. Sci. Technol.(20), R15–R29, 2007.
- [16.] J. G. Bednorz, K. A. Müller, Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, Zeitschrift für Physik B Condensed Matter 1986, Volume 64, Issue 2, pp 189-193.

- [17.] Teemu Hartikainen, Jorma Lehtonen, Risto Mikkonen, “Reduction of greenhouse-gas emissions by utilization of generation”, Applied Energy, Volume 78, Issue 2, Superconductivity in Electric-Power June 2004, Pages 151–158.
- [18.] Kristian Fosheim and Asle Sudbo, “Superconductivity Physics and Applications”, John Wiley and Sons, Ltd, 2004.
- [19.] Fang, J., Wen, J., Wang, S., Shi, J., Ren, L., Tang, Y., Chen, Z. Laboratory and Field Tests of Movable Conduction-Cooled High-Temperature SMES for Power System Stability Enhancement. IEEE TRANsactions On Applied Superconductivity, 23(4), August 2013
- [20.] Md Multan Biswas, Md Shafiul Azim, Tonmoy Kumar Saha, Umama Zobayer, Monalisa Chowdhury Urmi, Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems, Smart Grid and Renewable Energy, 2013, 4, 122-132. doi:10.4236/sgre.2013.41015 Published Online February 2013
- [21.] Carr, W. J., AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors. 2 ed. New York: Taylor and Francis, 2001.
- [22.] Safran, S., MgB<sub>2</sub> süperiletken tellerde alternatif akım kaybı ve akı perçinleme mekanizmaları. Ankara, Türkiye: Ankara Üniversitesi (Doktora Tezi), 2010.
- [23.] AEC, “Industrial Energy Savers, Energy Efficient Motors, North Carolina, Alternative Energy Corporation”, 2002.
- [24.] Kavak K., “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Verimliliği ve Türk Sanayiinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi”, Uzmanlık Tezi, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, 2005.
- [25.] Yıldırım F., “Generatörlerin Otomatik Senkronizasyonu” Y. L. Tezi, Mayıs 2014.
- [26.] Guzelbeyoglu N., “Elektrik Makineleri I II”, İTÜ Matbaası- P 118-154, 1992
- [27.] <https://okandinc.comelektrik-uretim-santralleri-verimlilik-karsilastirmalari-ve-dogaya-etkileri>, 29.06.2024
- [28.] Terzioğlu R., Çavuş T. Fedai, “Enerji Verimliliği ve Süperiletken Malzemeler”, IEE Transactions on applied Superconductivity, 23(4), August 2013.
- [29.] Woodward, SPM-D2-10B, Synchronizing Unit, Manual 37616B, Release 7.10-(<https://www.multisis.com.tr/senkronizer-br-senkron-check>)
- [30.] Aksoy F., (Bi, Pb) – 2223 Seramik Süperiletkenlerin yapısal ve Süperiletkenlik Özellikleri Üzerine Sb-AG Birlikte Katkılanmasının Etkisi, Aydın Adnan Menderes Ün. Fen Bil. Enst., 2022
- [31.] Aydem Enerji, blog yazısı, [https://www.aydemenerji.com.tr/blog/213/nukleer-enerji-nukleer-santral-nedir-/,](https://www.aydemenerji.com.tr/blog/213/nukleer-enerji-nukleer-santral-nedir-/) 30.12.2024
- [32.] Feka-Kontrolmatik, Faizabad Power Plant/Afganistan, Project Documents, 2022
- [33.] Yunying P., Danzhen G., superconducting Wind Turbine Generator, Shanghai University of Electric Power, pp3, 2016
- [34.] Zermeno R., Manuel V., Computation of Superconducting Generators for Wind Turbine Applications, pp5, 2012

## EKLER

### Ek-A: Senkronizasyon Rölesi Terminal Bağlantı Planı



Şekil A.1: Senkronizasyon Rölesi Slot Planı [29]

## Ek-B: Senkronizasyon Rölesi Ayar Aralıkları

**Çizelge B.1: Senkronizasyon Rölesi Ayar Aralıkları ve Standart Değerleri [29]**

Option	Parameter 100/400V; 1/5 A	Adjustment range	Standard setting	Customer settings
<b>CONFIGURE GENERAL PARAMETERS</b>				
	SPRACHE/LANGUAGE	German/Englisch	English	<input type="checkbox"/> G <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> G <input type="checkbox"/> E
	Softwareversion		7.10-0	
	Enter code number	0..9999	XXXX	
	Password Protection	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Reset on Factory Defaults	YES/NO	NO	<input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
	Allow Factory Defaults	YES/NO	NO	<input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> N
<b>CONFIGURE BASIC SETTINGS</b>				
	Rated Frequency fn	48.0..62.0 Hz	50.0 Hz	
	Generator freq. Setpoint	48.0..62.0 Hz	50.0 Hz	
	Voltage system 1 secondary	50..440 V	400 V	
	Voltage system 2 secondary	50..440 V	400 V	
	Voltage system 1 primary	0.1..65.0 kV	0.4 kV	
	Voltage system 2 primary	0.1..65.0 kV	0.4 kV	
	Rated voltage Vn	70..420 V	400 V	
	Voltage system 2 Setpoint	50..440 V	400 V	
<b>CONFIGURE CONTROLLER</b>				
	Automatic idle Running	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Freq. controller	ON/OFF	ON	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Freq. controller Isol. oper	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Freq. Controller Ramp	0.1..99.9 Hz/s	5.0 Hz/s	
A	Freq. contr. (A) Dead band	0.02..1.00 Hz	0.10 Hz	
-	Freq. contr. (A) Time pulse>	10..250 ms	80 ms	
A	Freq. contr. (A) Gain Kp	0.1..99.9	5.0	
B	Freq. contr. (B) Dead band	0.02..1.00 Hz	0.10 Hz	
-	Freq. contr. (B) Time pulse>	10..250 ms	80 ms	
B	Freq. contr. (B) Gain Kp	0.1..99.9	30.0	
	Volt. controller	ON/OFF	ON	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Volt. controller Isol. oper.	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Volt. controller Ramp	1..99 V/s	25 V/s	
A	Volt. contr. (A) Dead band	0.1..25.0 %	0.5 %	
-	Volt. contr. (A) Time pulse>	20..250 ms	80 ms	
A	Volt. contr. (A) Gain Kp	0.1..99.9	5.0	
B	Volt. contr. (B) Dead band	0.1..25.0 %	0.5 %	
-	Volt. contr. (B) Time pulse>	20..250 ms	80 ms	
B	Volt. contr. (B) Gain Kp	0.1..99.9	30.0	
<b>CONFIGURE SYNCHRONIZATION</b>				
	Synchronizing functions	ON/OFF	ON	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Synchrocheck- mode	ON/OFF	OFF	
	Synchronization df offs.=	0.02..0.25 Hz	0.10 Hz	
	Synchronization df max	0.02..0.49 Hz	0.18 Hz	
	Synchronization df min	0.00..-0.49 Hz	-0.10 Hz	
	Synchronization dV max	0.1..15.0 %	6 %	
	Synchronization Brk.hold T>	0.04..0.50 s	0.20 s	
	Phase matching	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
A	Slip synchroniz. Max.phase<	0..60°	7 °	
B	Slip synch. (A) TClose CB	40..300 ms	80 ms	
B	Slip synch. (B) TClose CB	40..300 ms	80 ms	
	Phase matching Max phase <	0..60 °	7 °	
	Phase matching Dwell time	0.2..10.0 s	10.0 s	
	Phase matching Gain	1..36	2	
	Phase matching df start	0.02..0.25 Hz	0.20 Hz	
<b>CONFIGURE SYNCH TIME MONITORING</b>				
	Sync.time contr. Alarm	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Synch.Zeitüberw. Delay time	10..999 s	120 s	
<b>CONFIGURE BLACK START</b>				
	Black start	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Black start U1=0/U2=0	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Black start U1=0/U2=Un	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Black start U1=Un/U2=0	ON/OFF	OFF	<input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off <input type="checkbox"/> on <input type="checkbox"/> off
	Black start Tmin >	0..20 s	5 s	
	Black start dV  V-0  <	3..50 %	10 %	
	Black start dV  V-Vn  <	1..20 %	5 %	
	Black start df max =	0.05..5.00 Hz	0.25 Hz	
	Rel.connect 2	OFF / only asyn. / only syn. / syn/asyn.	OFF	
<b>CONFIGURE PASSWORD</b>				
	Define level 1 code	0000..9999	0001	
	Define level 2 code	0000..9999	0002	

## **START UP PROCEDURE FOR GENERATOR**

### **INDEX**

1. SCOPE
2. VOLTAGE AT THE LINE
3. BLACK START WITH STATION DIESEL GENERATOR
4. BLACK START WITH PEAK DIESEL GENERATOR

### **1. Scope**

The scope of this document is to describe the basic commissioning stages of the Faizabad Hydroelectric Power Plant.

In this document, 3 different startup methods are explained:

- 1- If there is voltage at the line;  
If there is voltage at the line, we can energized our station service transformer using 20kV end 6,3kV Medium Voltage switchgear equipment. After energization the Station service transformer, generator can be synchronous 6,3kV busbar using Generator Circuit Breaker
- 2- Black Start with Station Auxiliary Diesel Generator  
In this scenario there will be no voltage at the line. That's why, Essential busbar has to de energized using Station Diesel Generator. After energizing the essential bus, Generator can be synchronous using 6,3kV Generator Circuit Breaker.
- 3- Black Start with Peak Diesel Generator  
In this scenario there will be no voltage at the line also. Peak Diesel Generator will back supply to 6,3kV using BAT Transformer. After energizing the essential bus, Generator can be synchronous using 6,3kV Generator Circuit Breaker

Some examples are shown below, under energized line conditions or under de-energized line conditions.

As a general rule, synchronization will be at the 6,3kV busbar and scenario has to be configure using this rule.

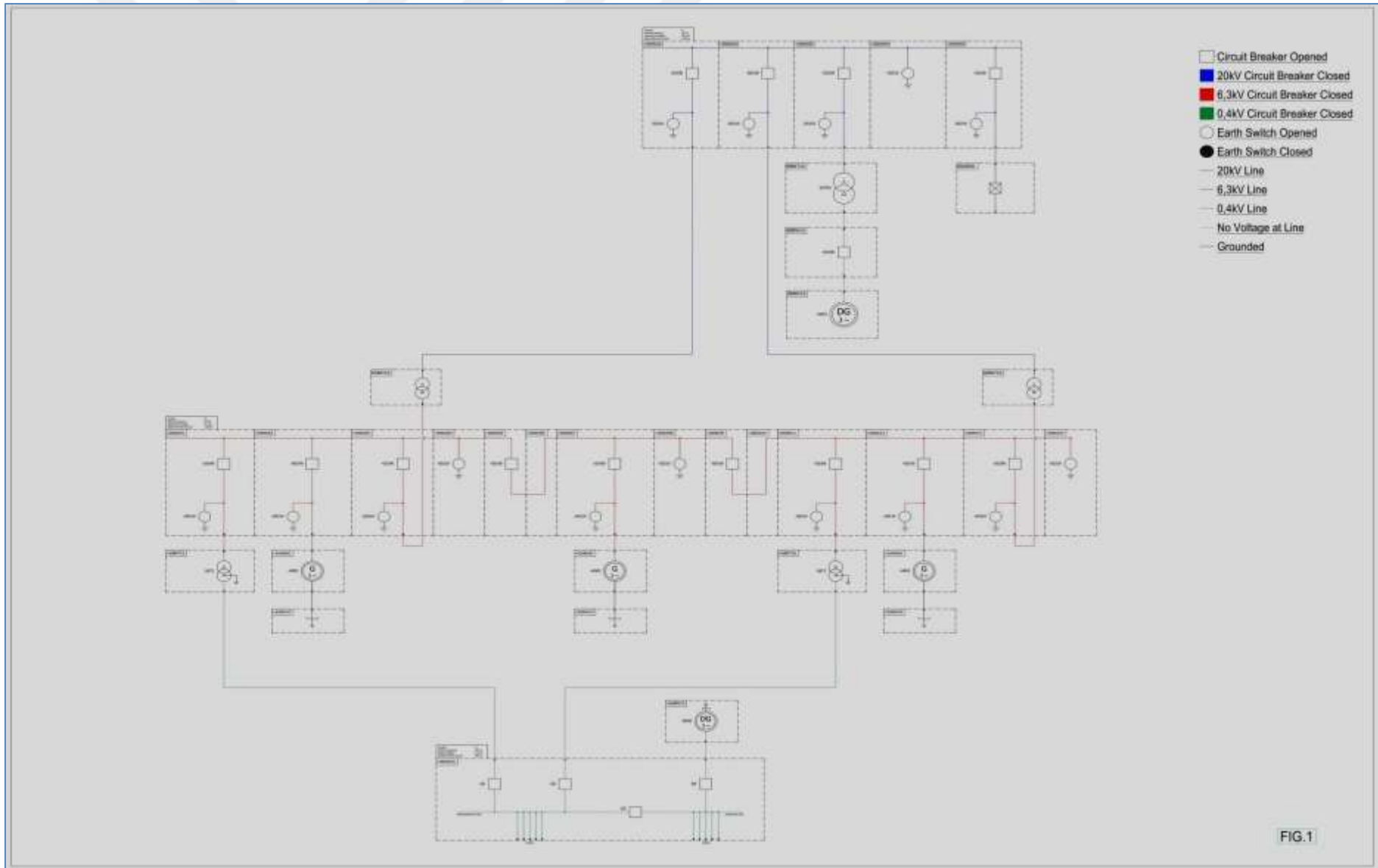


FIG.1

## **2. Voltage at the Line**

If there is voltage at line;

- 1- 20kV Line Feeder's (09AJD50) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Line – Dead Bus ).  
With this operation 20kV busbar will be energized. (FIG-2.2)
- 2- 20kV Transformer Feeder's (09AJD10) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Dead Bus – Live Bus ).  
With this operation 01BAT10 will be energized. (FIG-2.3)
- 3- 6,3kV Transformer Feeder's (00AKD03) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Dead Bus – Live Bus ).  
With this operation 6,3kV busbar will be energized. (FIG-2.4)
- 4- 6,3kV Auxiliary Transformer Feeder's (00AKD01) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Bus – Dead Line ).  
With this operation Auxiliary Transformer (SST1) will be energized. (FIG-2.5)
- 5- 0,4kV AC Distribution Panel's (00MDP10) SST1 Incoming Circuit Breaker (Q1) and Coupling Circuit Breaker (Q3) will be close.  
With this operation 0.4kV AC Bus will be energized and also all necessary loads for the generator auxiliary system will be fed. (FIG-2.6)
- 6- After fed all necessary loads, Generator (HG01) can be start. (FIG-2.7)
- 7- 6,3kV Generator Feeder's (00AKD02) Circuit Breaker (GS100) will be close with using Sync Relay (Woodward) close command at the Generator Control Panel (00GCP01) (FIG-2.8)

Note: Sync Relay will take voltage information from 6,3kV Busbar and 6,3kV Generator.

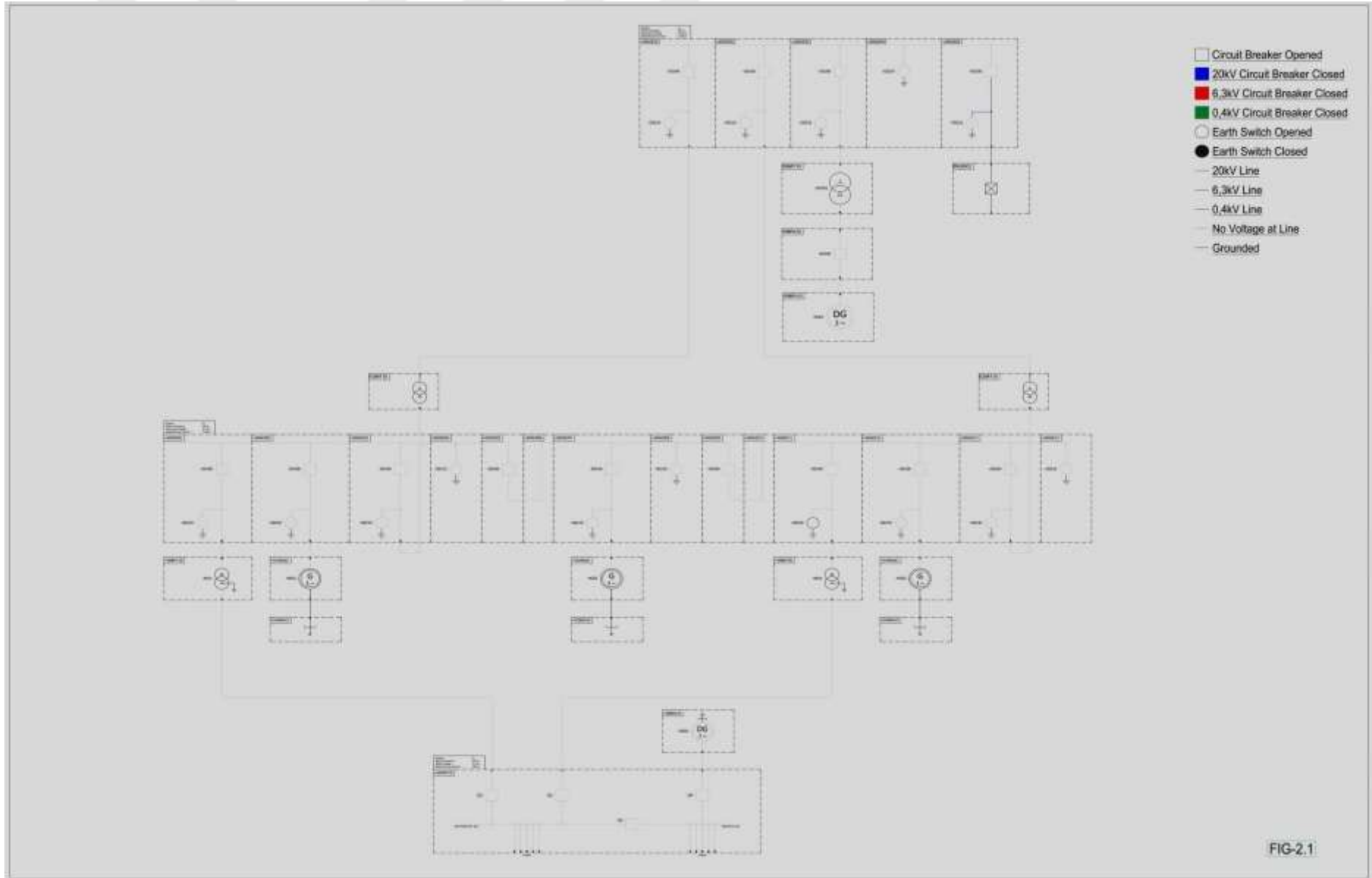
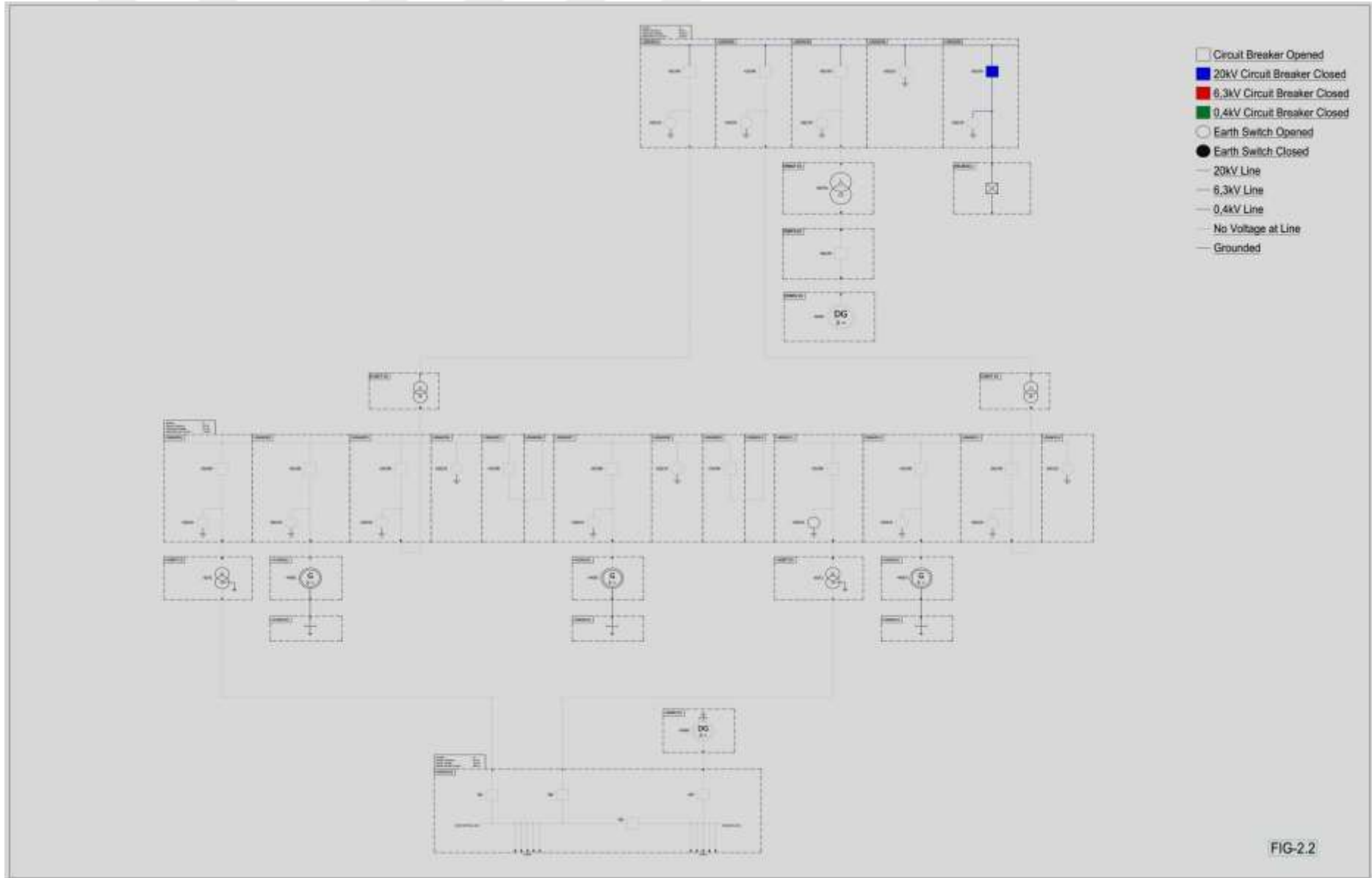
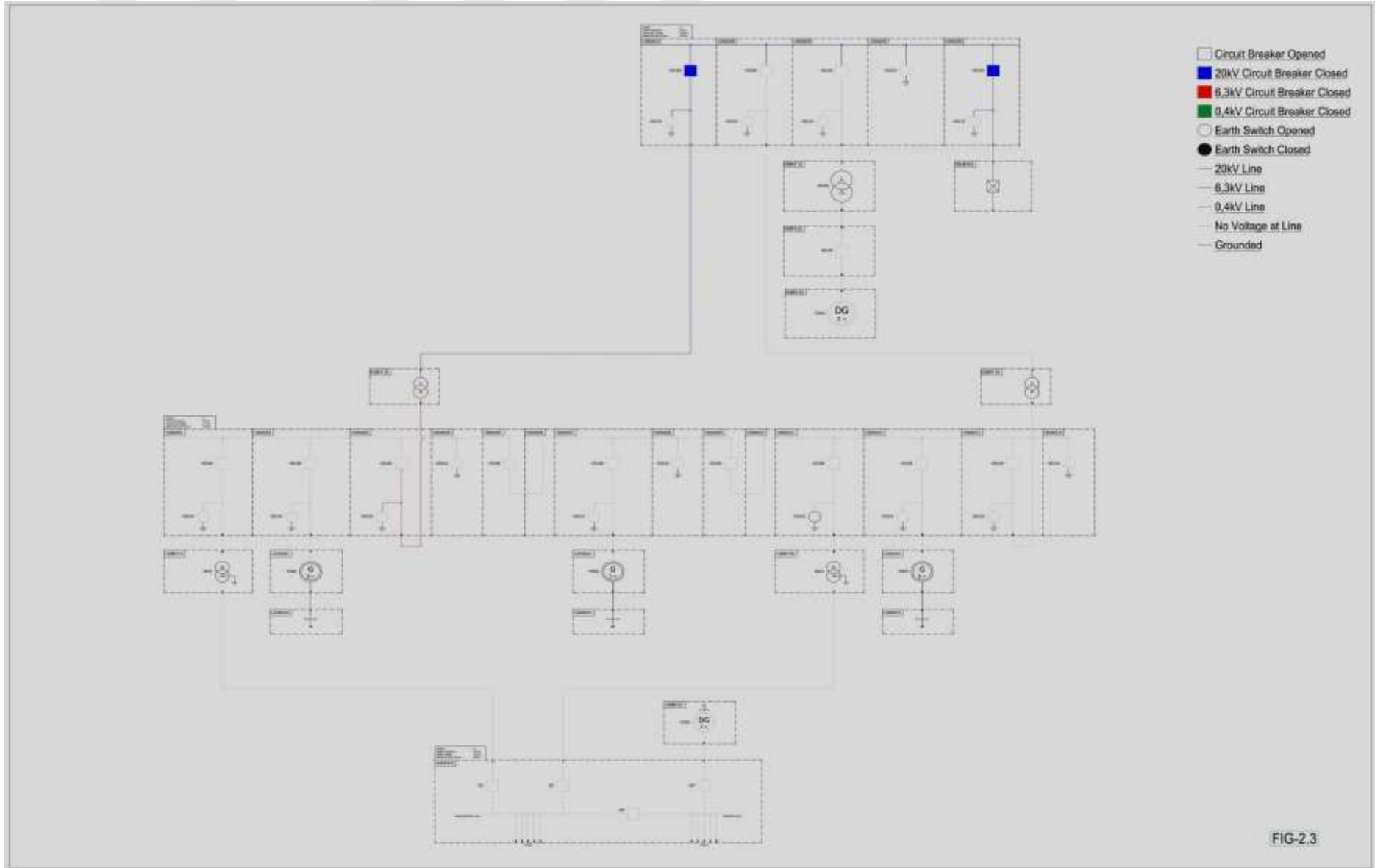


FIG-2.1





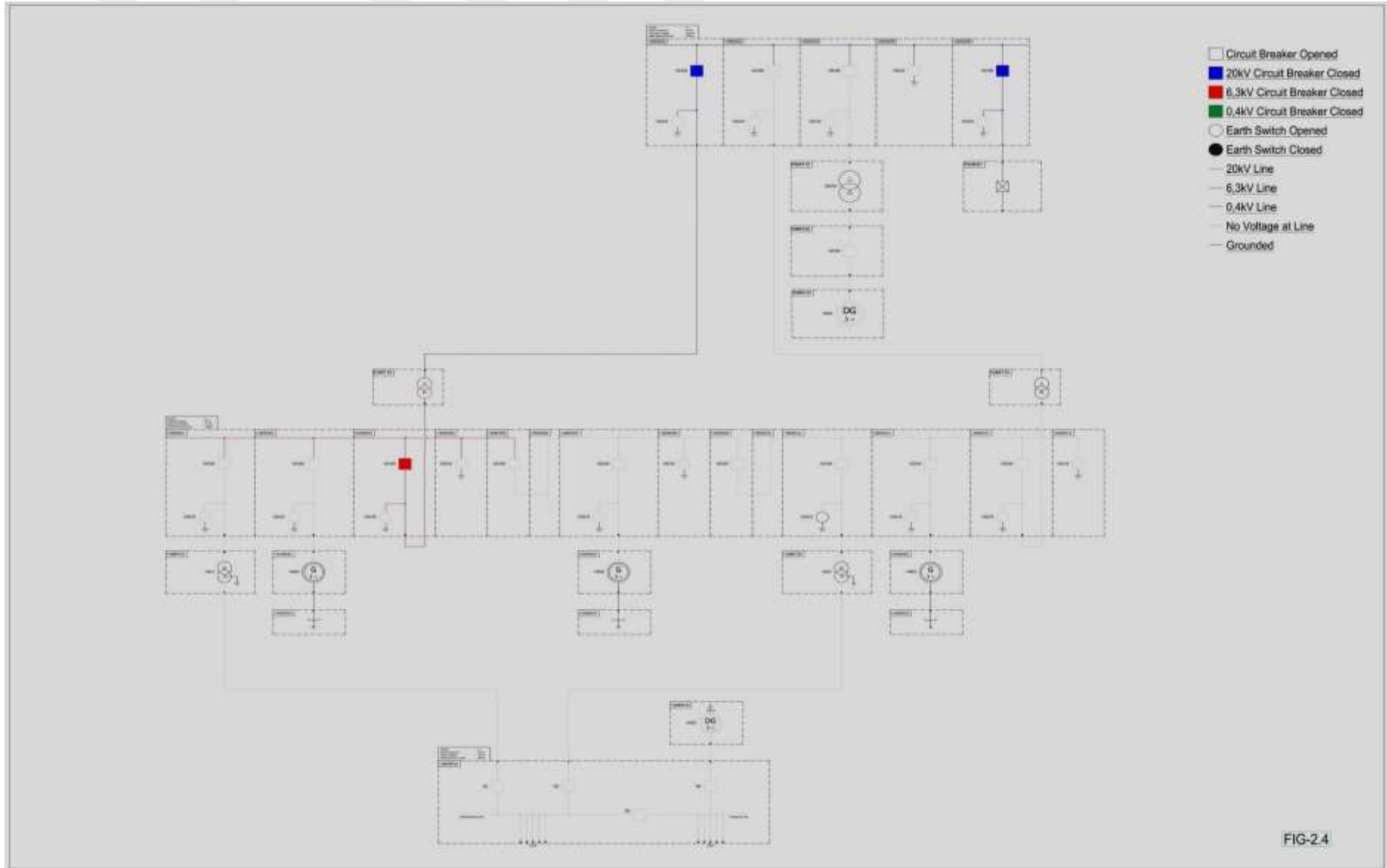
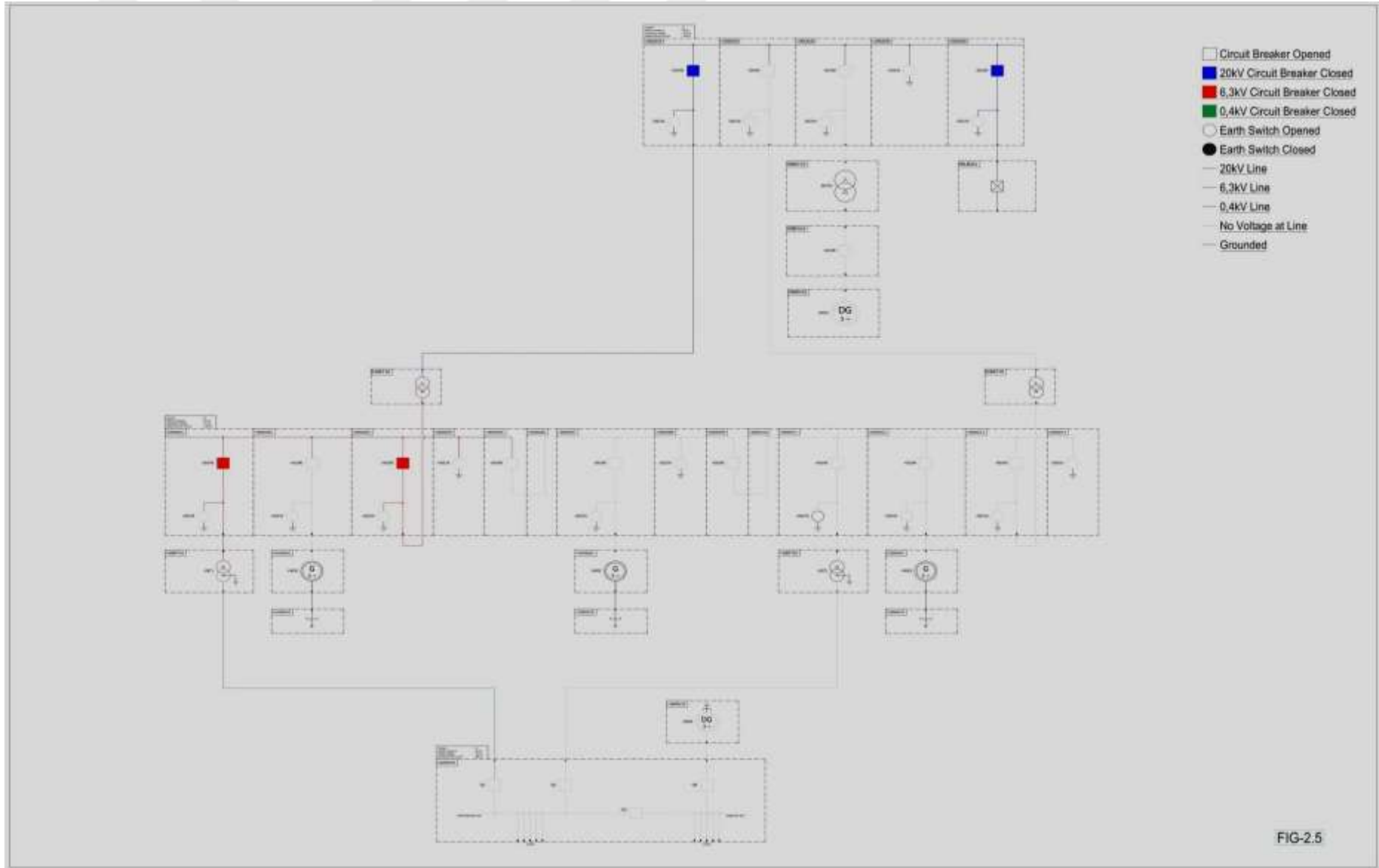
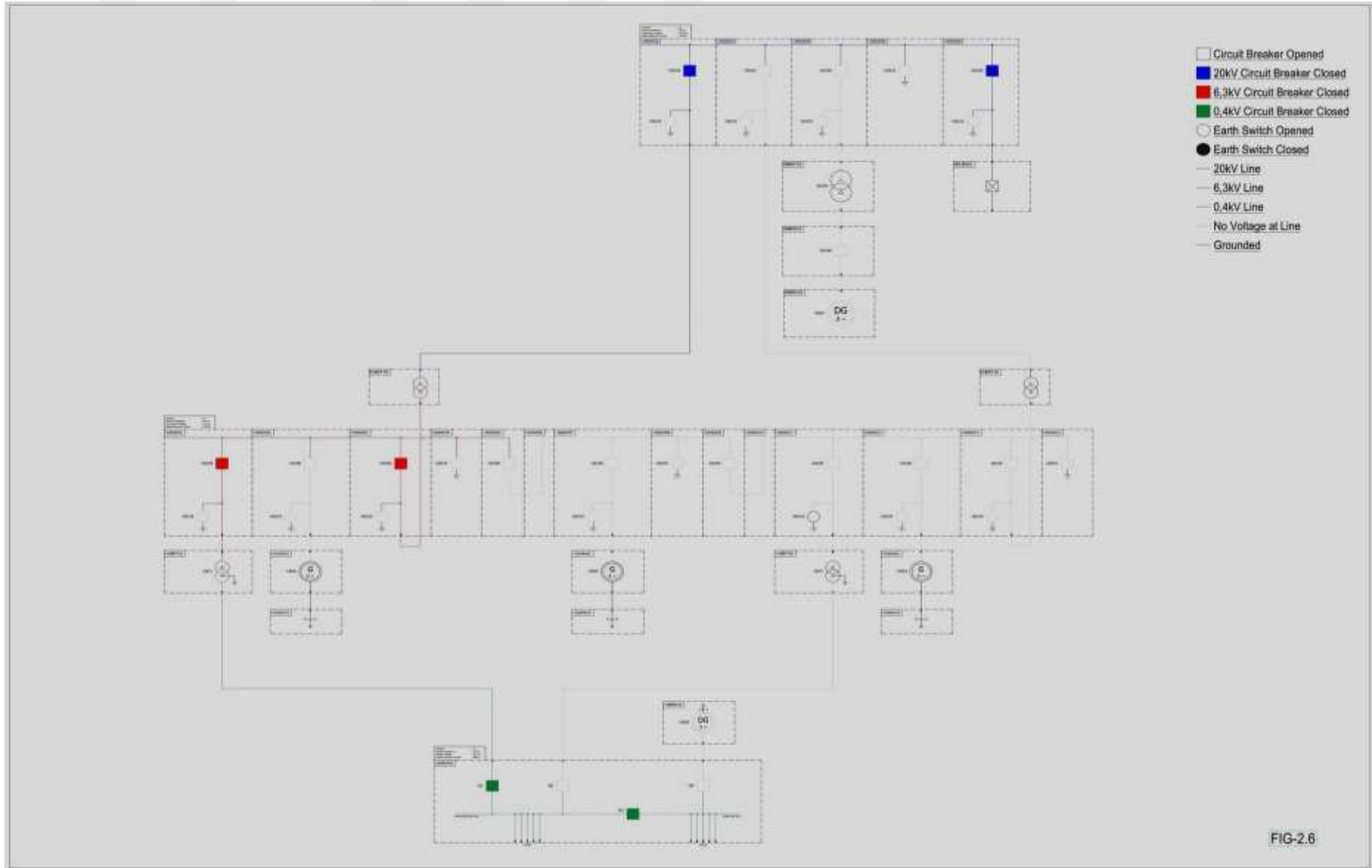
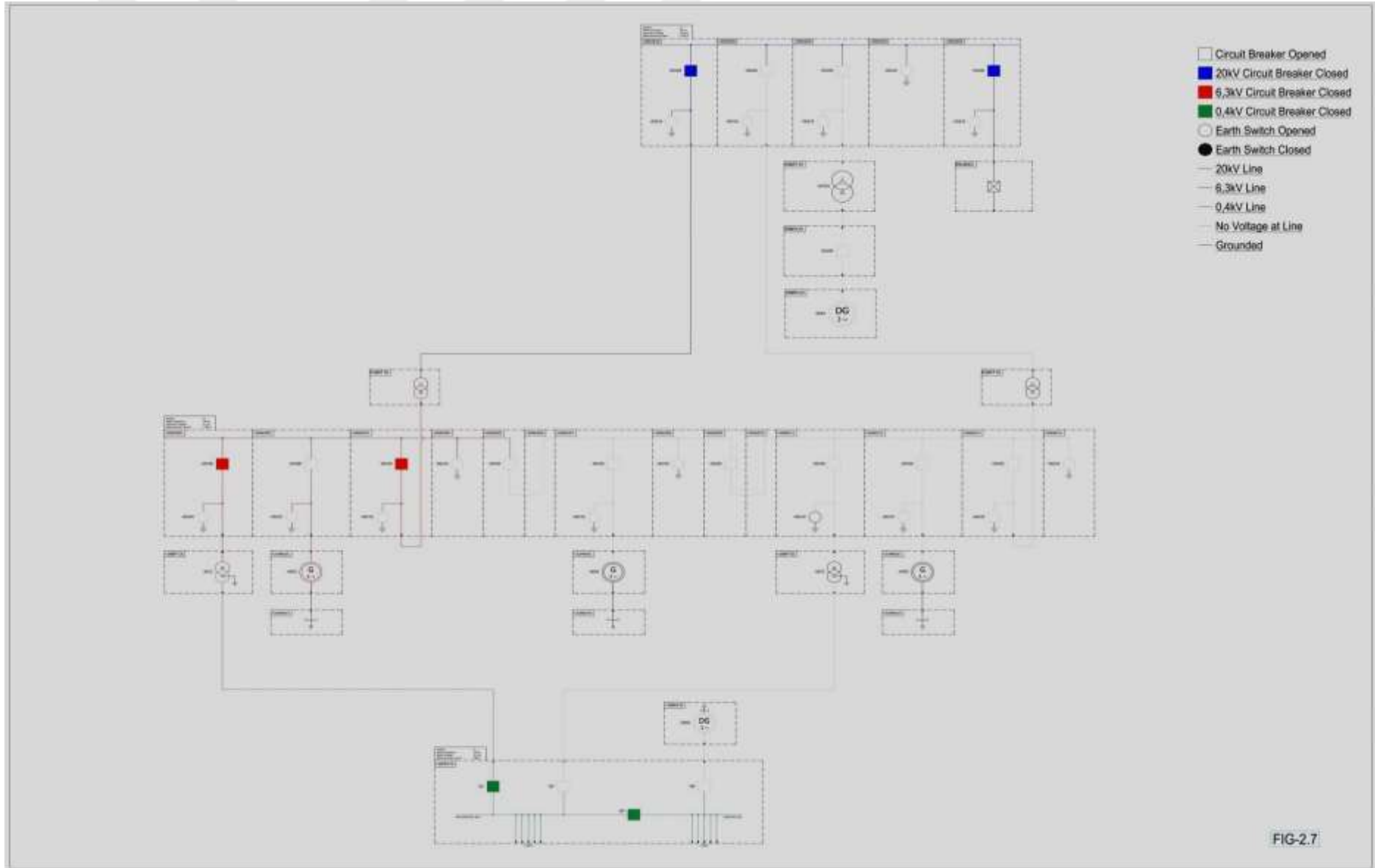


FIG-2.4







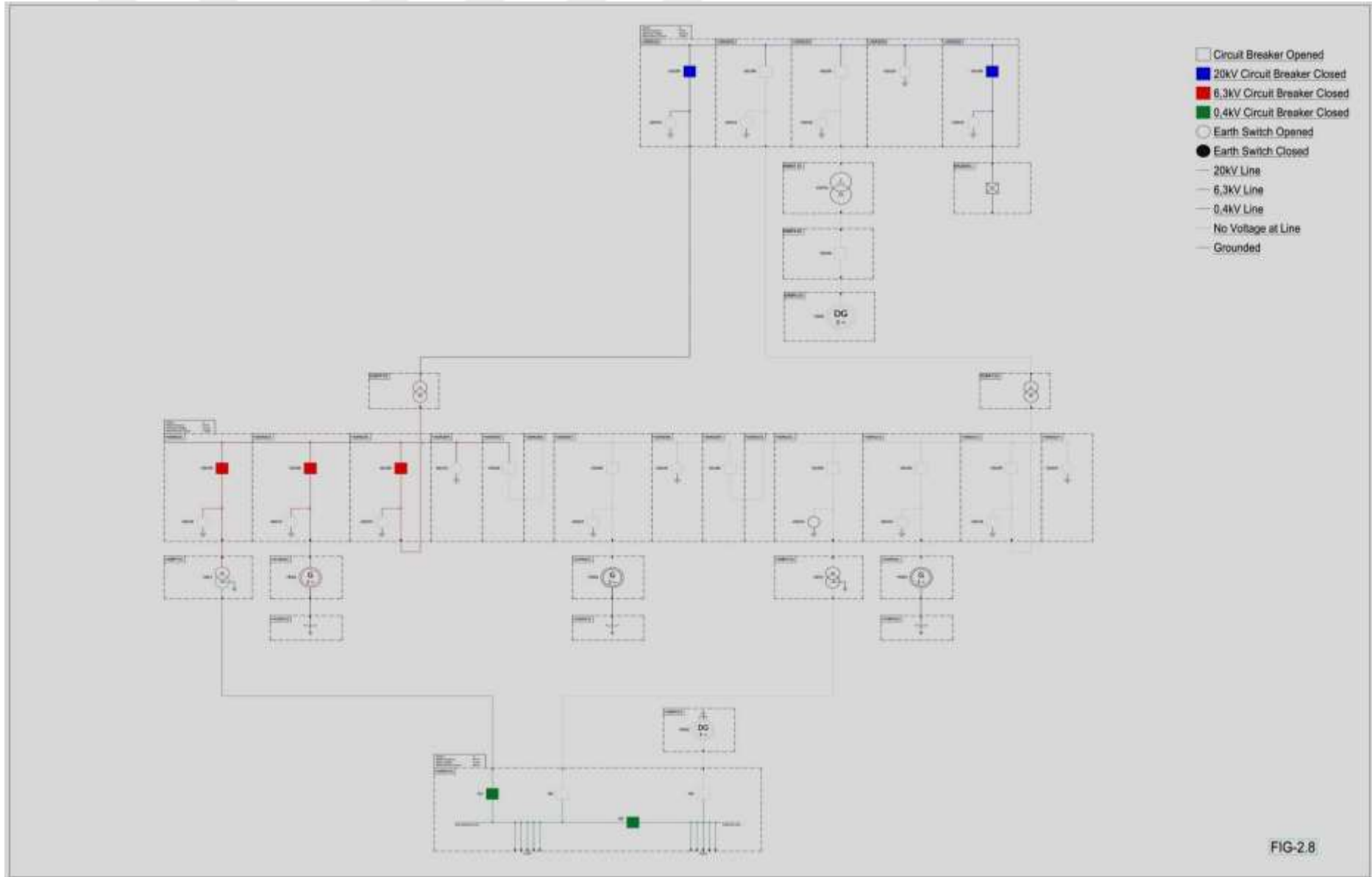


FIG-2.8

### 3. Black Start with Station Diesel Generator

If there is no voltage at line;

- 1- 0,4kV Station Service Diesel Generator (00BRV10) will be start. (FIG-3.1)
- 2- 0,4kV Station Service Diesel Generator's (00BRV10) Circuit Breaker (Q4) will be close.

With this operation 0.4kV AC Bus will be energized and also all necessary loads for the generator auxiliary system will be fed. (FIG-3.2)

- 3- After fed all necessary loads, Generator (HG01) can be start. (FIG-3.3)
- 4- 6,3kV Generator Feeder's (00AKD02) Circuit Breaker (GS100) will be close with using Sync Relay (Woodward) close command at the Generator Control Panel (00GCP01) (FIG-3.4)

Note: Sync Relay will take voltage information from 6,3kV Busbar and 6,3kV Generator ( Live Line – Dead Bus).

- 5- 6,3kV Station Service Transformer Feeder's (00AKD01) Circuit Breaker (GS100) will be close. with Synchro Check. ( Live Bus – Dead Line ).  
With this operation, Auxiliary Transformer (SST1) will be energized. (FIG-3.5)

- 6- 0,4kV AC Distribution Panel's (00MDP10) SST1 Incoming Circuit Breaker will be close using Automatic Transfer Switch

With this operation, 0.4kV AC Non Essential Bus will be energized (FIG-3.6)

After non-essential bus energized, ATS will initiate.

Essential Bus will be de-energized (using 0,4kV Station Service Diesel Generator's (00BRV10) Circuit Breaker (Q4)) and then will close to 0,4kV Coupling Circuit Breaker (Q3) for energized again to essential bus. (FIG-3.7)

Note : With this operation Essential Bus will be de-energize a few second.

- 7- 6,3kV Transformer Feeder's (00AKD03) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Bus – Dead Bus ).

With this operation 01BAT10 will be energized. (FIG-3.8)

- 8- 20kV Transformer Feeder's (09AJD10) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Line – Dead Bus ).

With this operation 20kV busbar will be energized. (FIG-3.9)

- 9- 20kV Line Feeder's (09AJD50) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Bus – Dead Line ).

With this operation 20kV Line will be energized. (FIG-3.10)

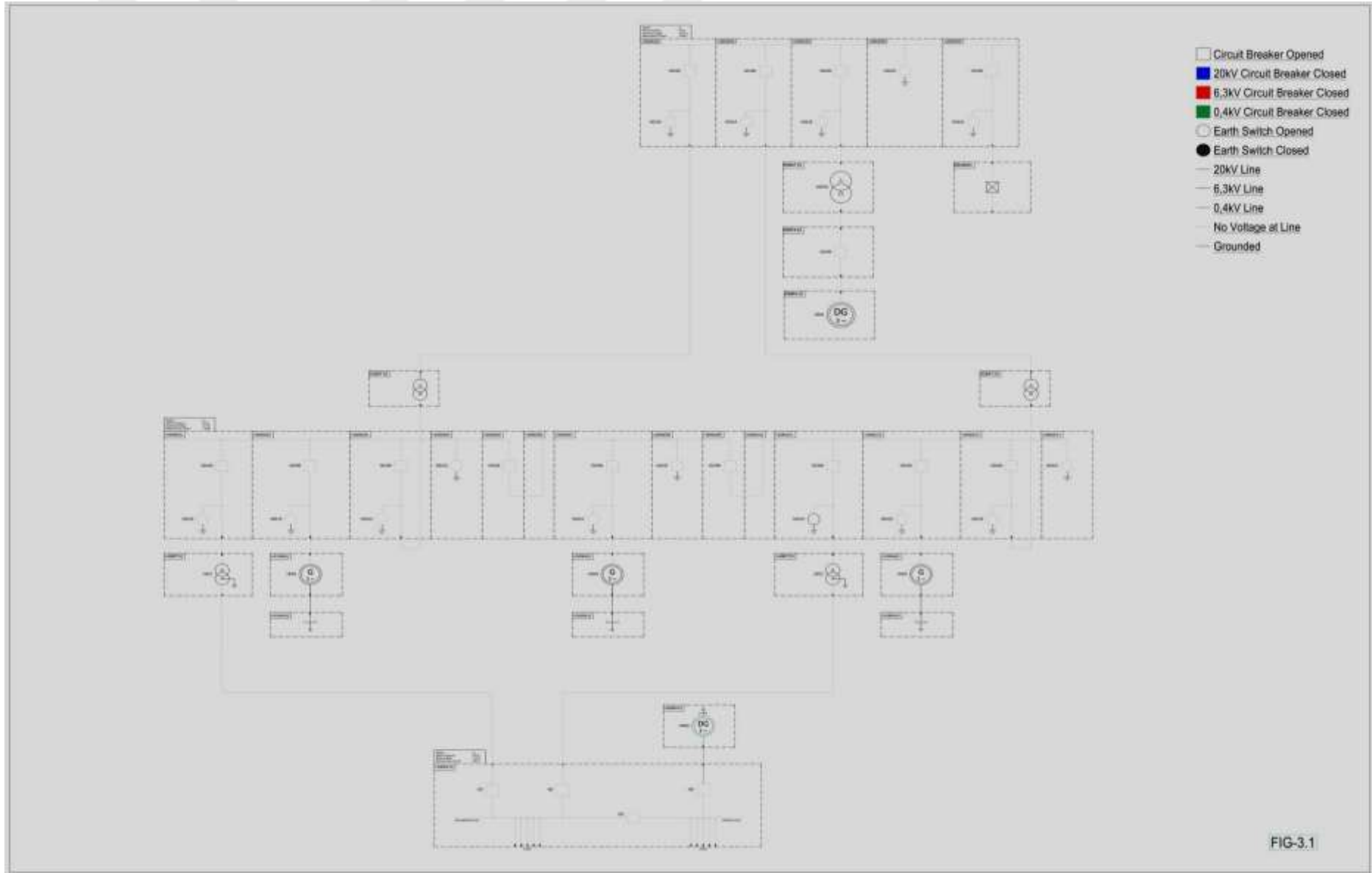


FIG-3.1

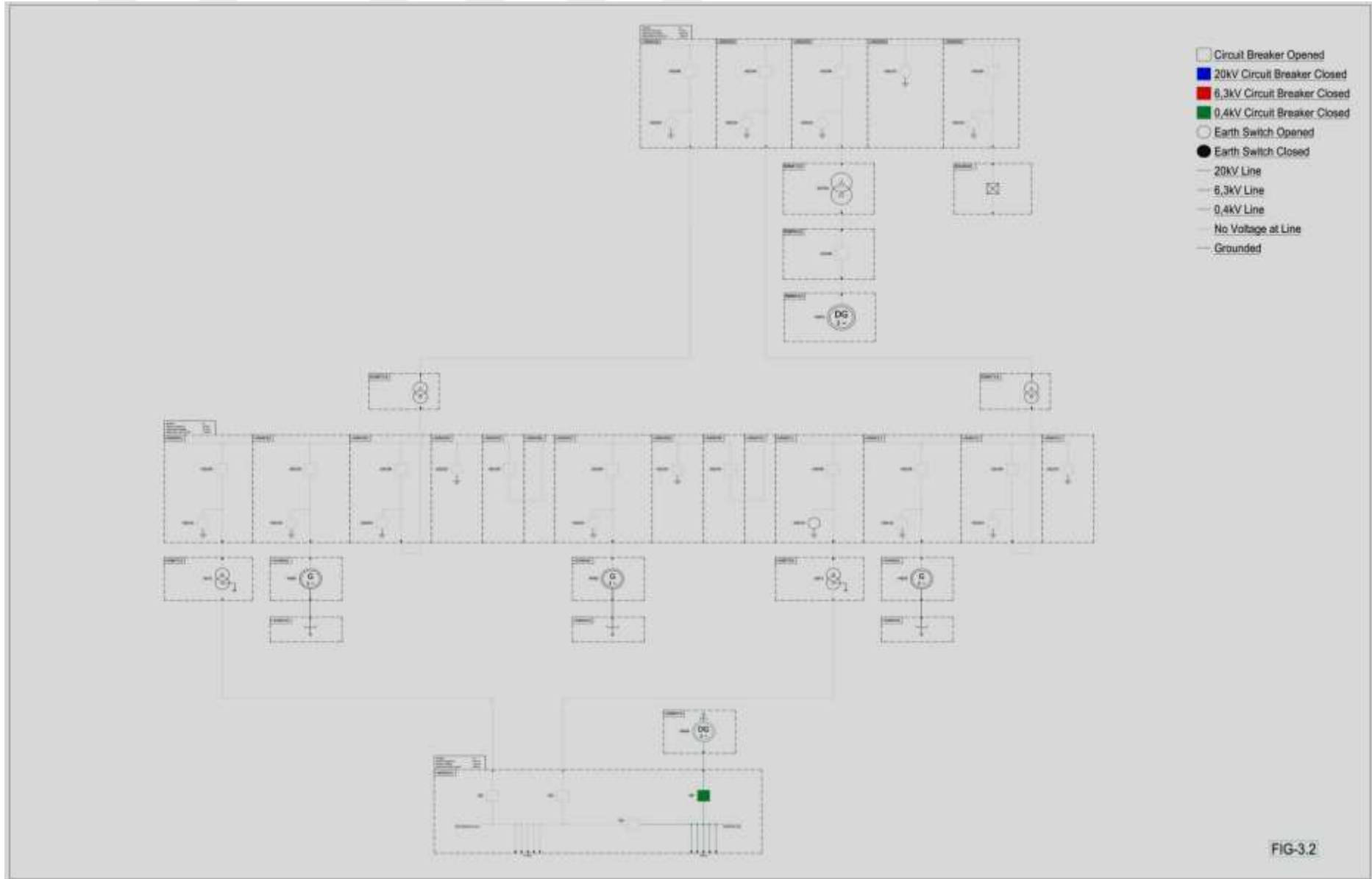
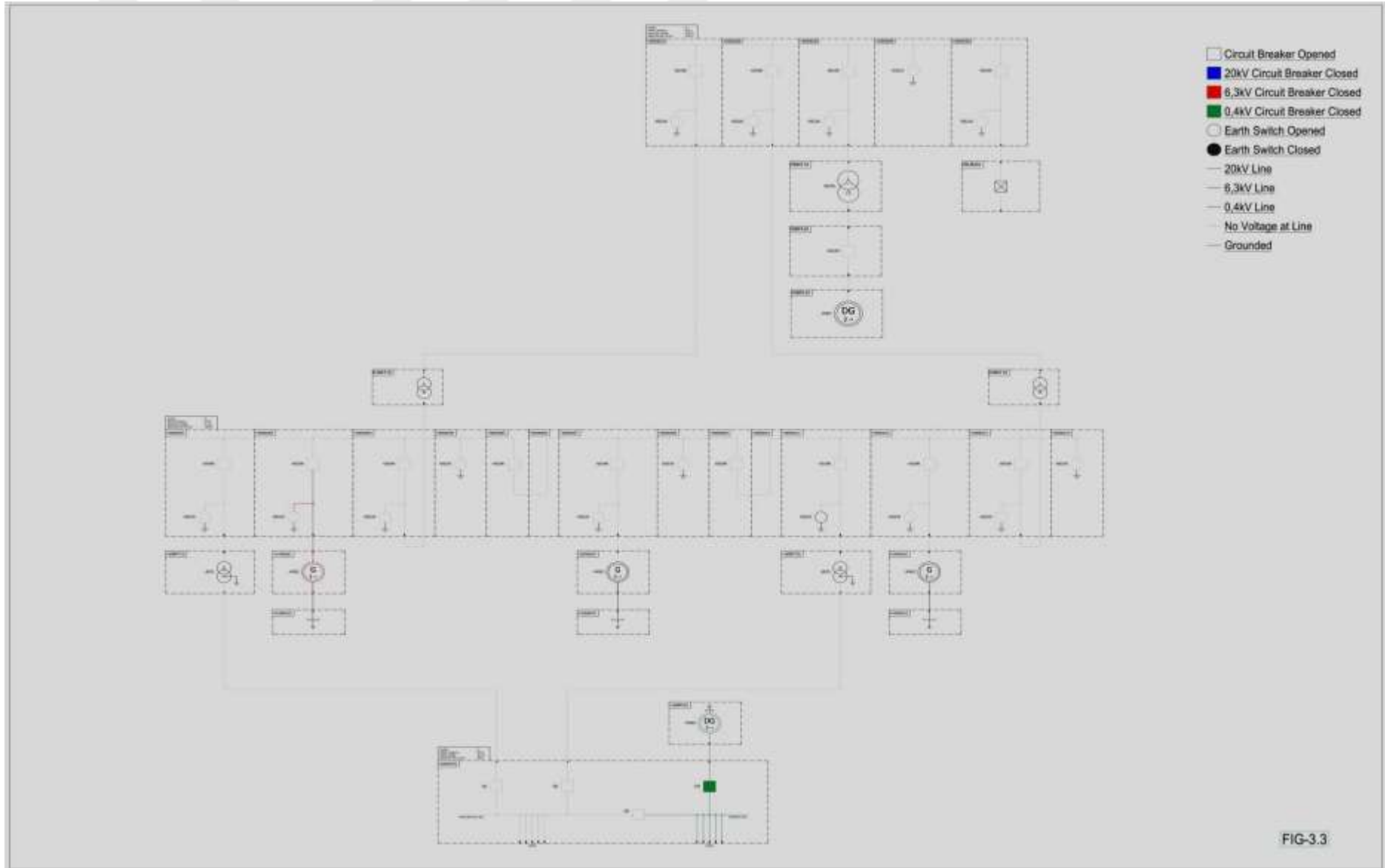
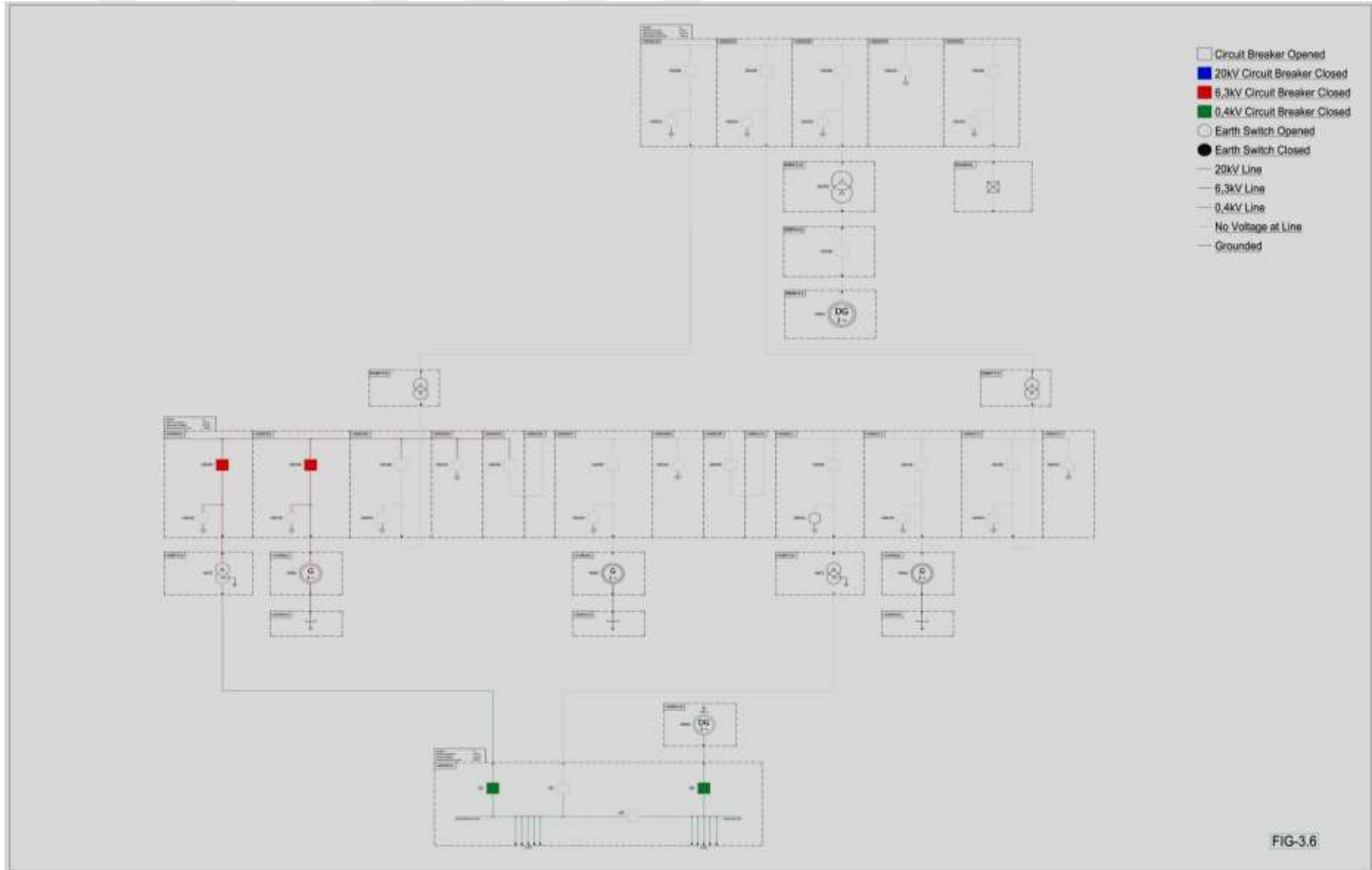
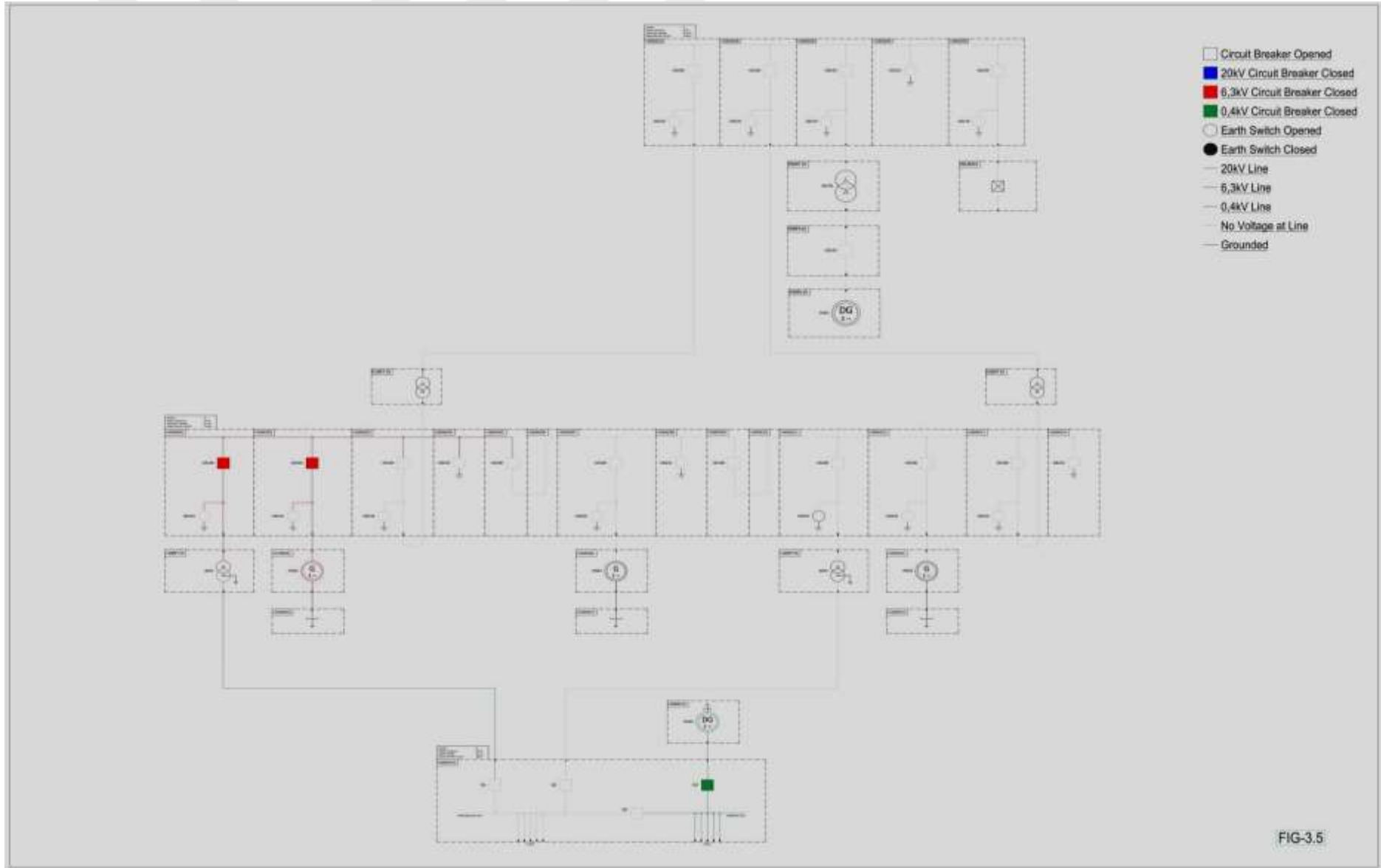




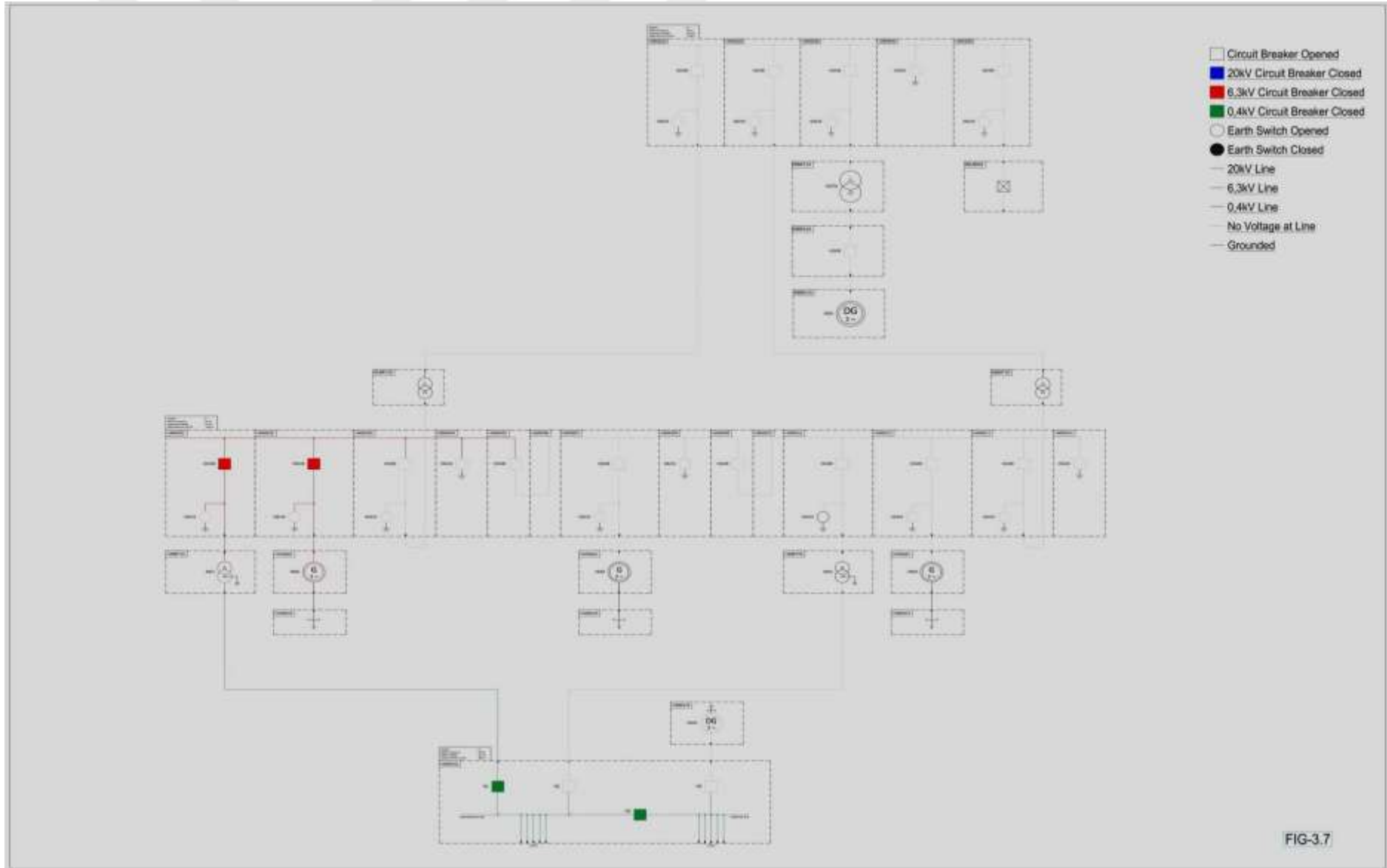
FIG-3.4



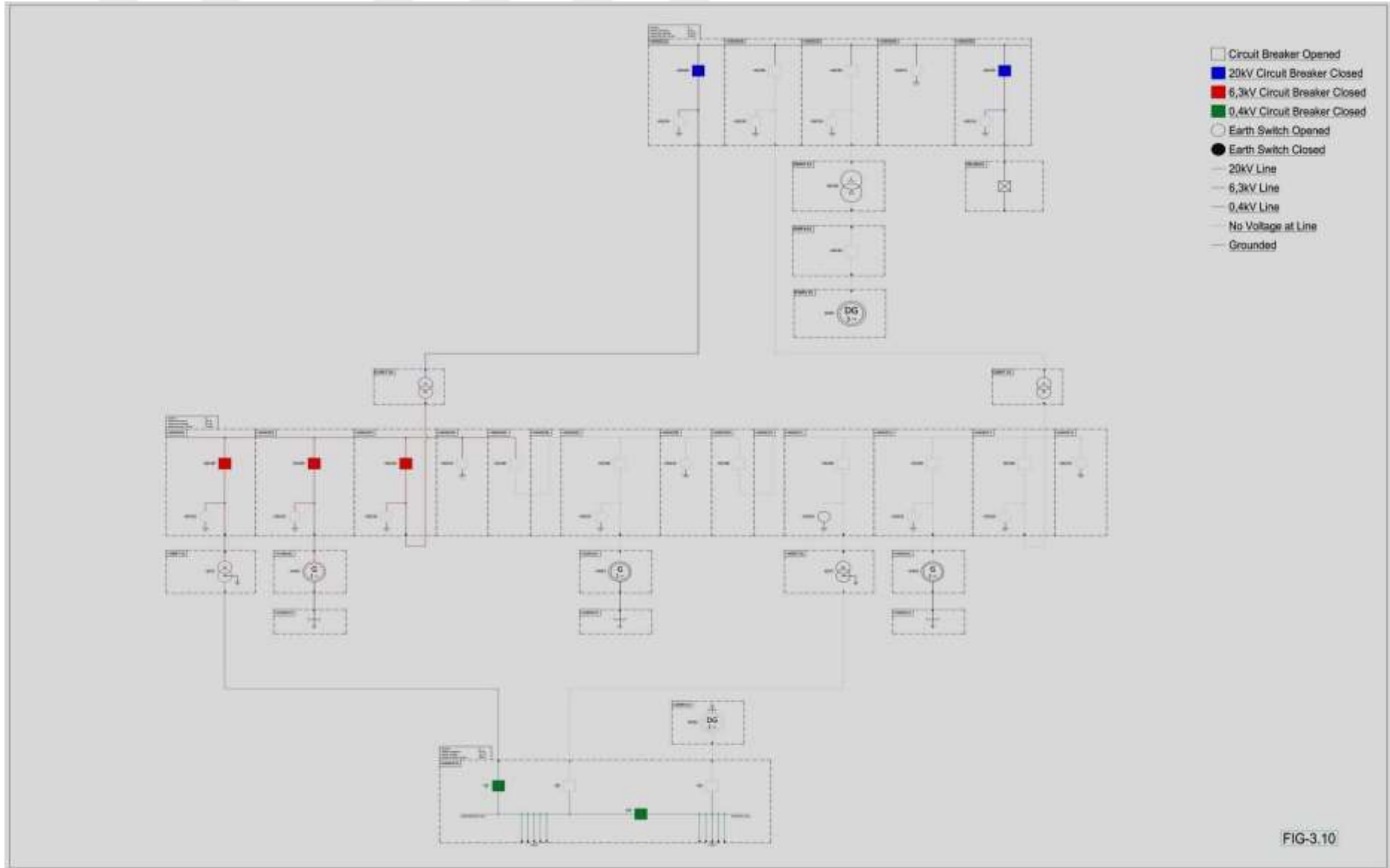












#### 4. Black Start with Peak Diesel Generator

If there is no voltage at line;

- 1- 20kV Line Feeder's (09AJD50) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Dead Line – Dead Bus ). (FIG-4.1)
- 2- 20kV Emergency Peak Diesel Generator Feeder's (09AJD30) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Dead Bus – Dead Line ). (FIG-4.2)
- 3- 20kV Emergency Peak Diesel Generator (09BRV10) can be start. (FIG-4.2)
- 4- 20kV Emergency Peak Diesel Generator's (09BRV10) Circuit Breaker (09BFA10 / GS100) will be close.  
With this operation 20kV Busbar will be energized via 0,4kV/20kV Emergency Peak Diesel Generator Transformer (09BAT10) (FIG-4.3)
- 5- 20kV Transformer Feeder's (09AJD10) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Bus – Dead Line ).  
With this operation 20kV / 6,3kV Power Transformer (01BAT10) will be energized. (FIG-4.4)
- 6- 6,3kV Transformer Feeder's (00AKD03) Circuit Breaker (GS100) will be close with Synchro Check ( Live Line – Dead Bus ).  
With this operation 6,3kV busbar will be energized. (FIG-4.5)
- 7- 6,3kV Station Service Transformer Feeder's (00AKD01) Circuit Breaker (GS100) will be close. with Synchro Check ( Live Bus – Dead Line ).  
With this operation Auxiliary Transformer (SST1) will be energized. (FIG-4.6)
- 8- 0,4kV AC Distribution Panel's (00MDP10) SST1 Incoming Circuit Breaker (Q1) and Coupling Circuit Breaker (Q3) will be close  
With this operation 0.4kV AC Bus will be energized and also all necessary loads for the generator auxiliary system will be fed. (FIG-4.7)
- 9- After fed all necessary loads, Generator (HG01) can be start. (FIG-4.8)
- 10- 6,3kV Generator Feeder's (00AKD02) Circuit Breaker (GS100) will be close  
with using Sync Relay (Woodward) close command at the Generator Control Panel (00GCP01) (FIG-4.9)  
Note: Sync Relay will take voltage information from 6,3kV Busbar and 6,3kV Generator.
- 11- 20kV Emergency Peak Diesel Generator Feeder's (09AJD30) Circuit Breaker (GS100) will be open. (FIG-4.10)
- 12- 20kV Emergency Peak Diesel Generator (09BRV10) can be stop. (FIG-4.11)  
Note: In this operation Line Load cannot be bigger than to Emergency Peak Diesel Generator Power.

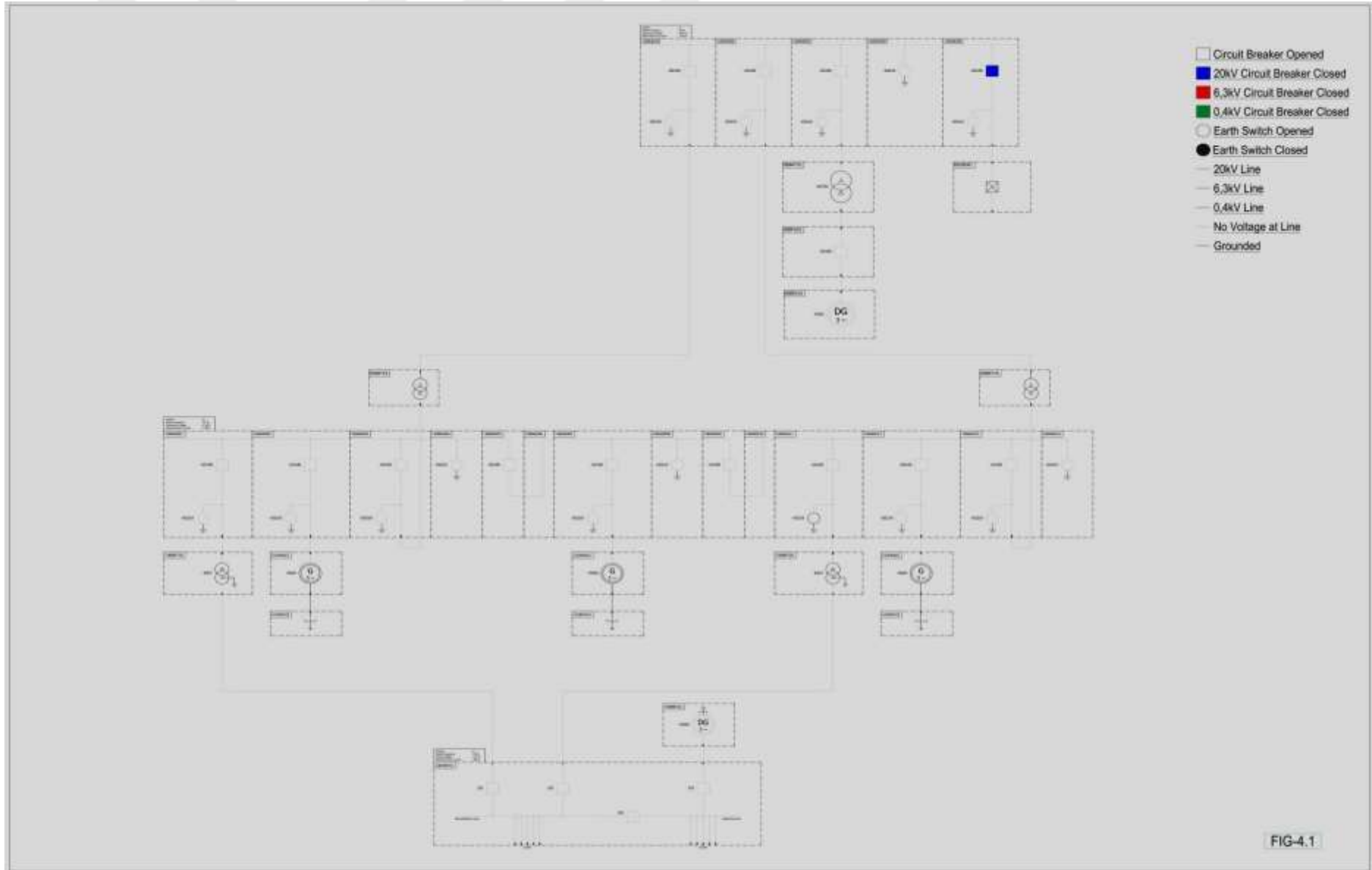
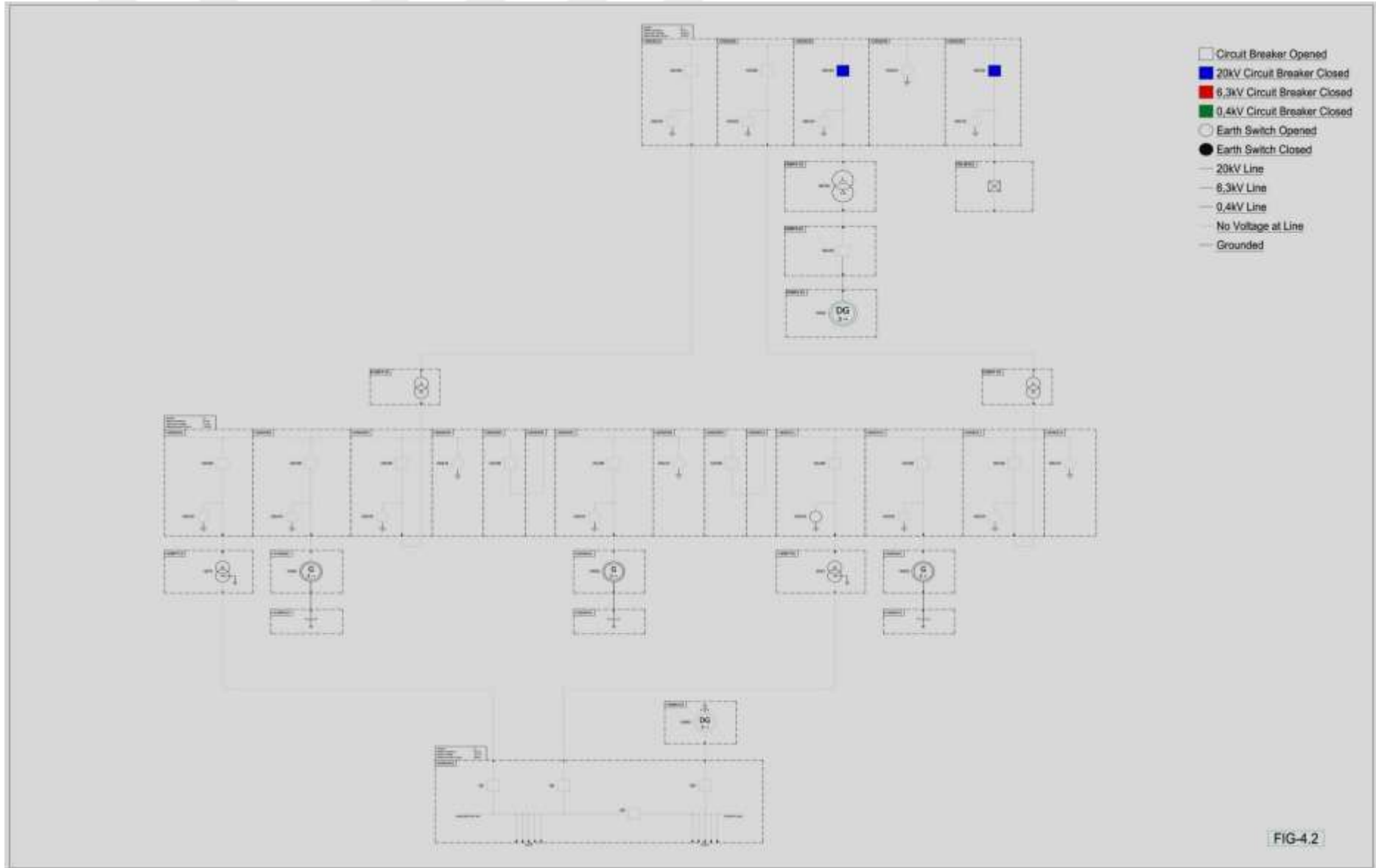
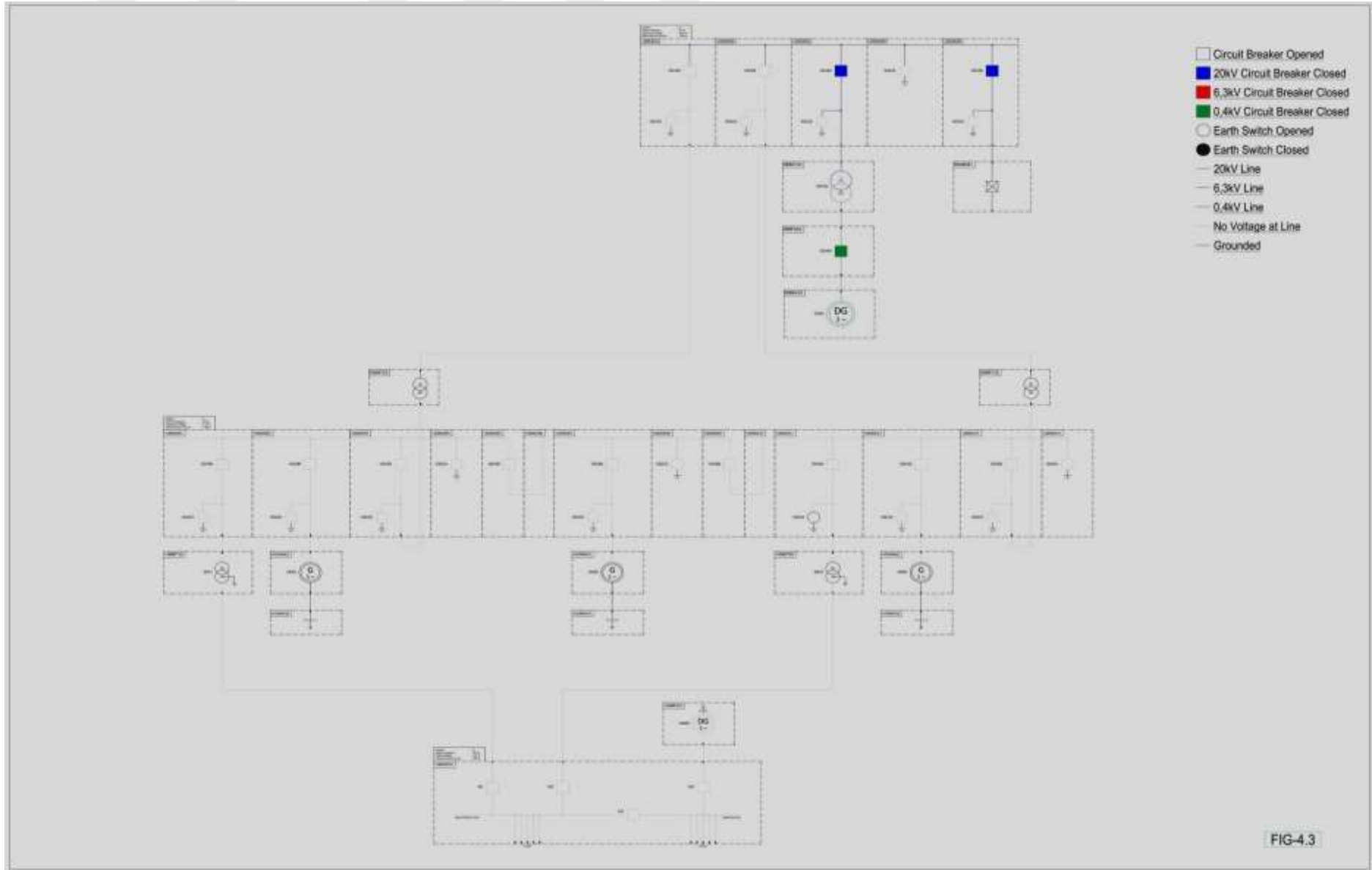
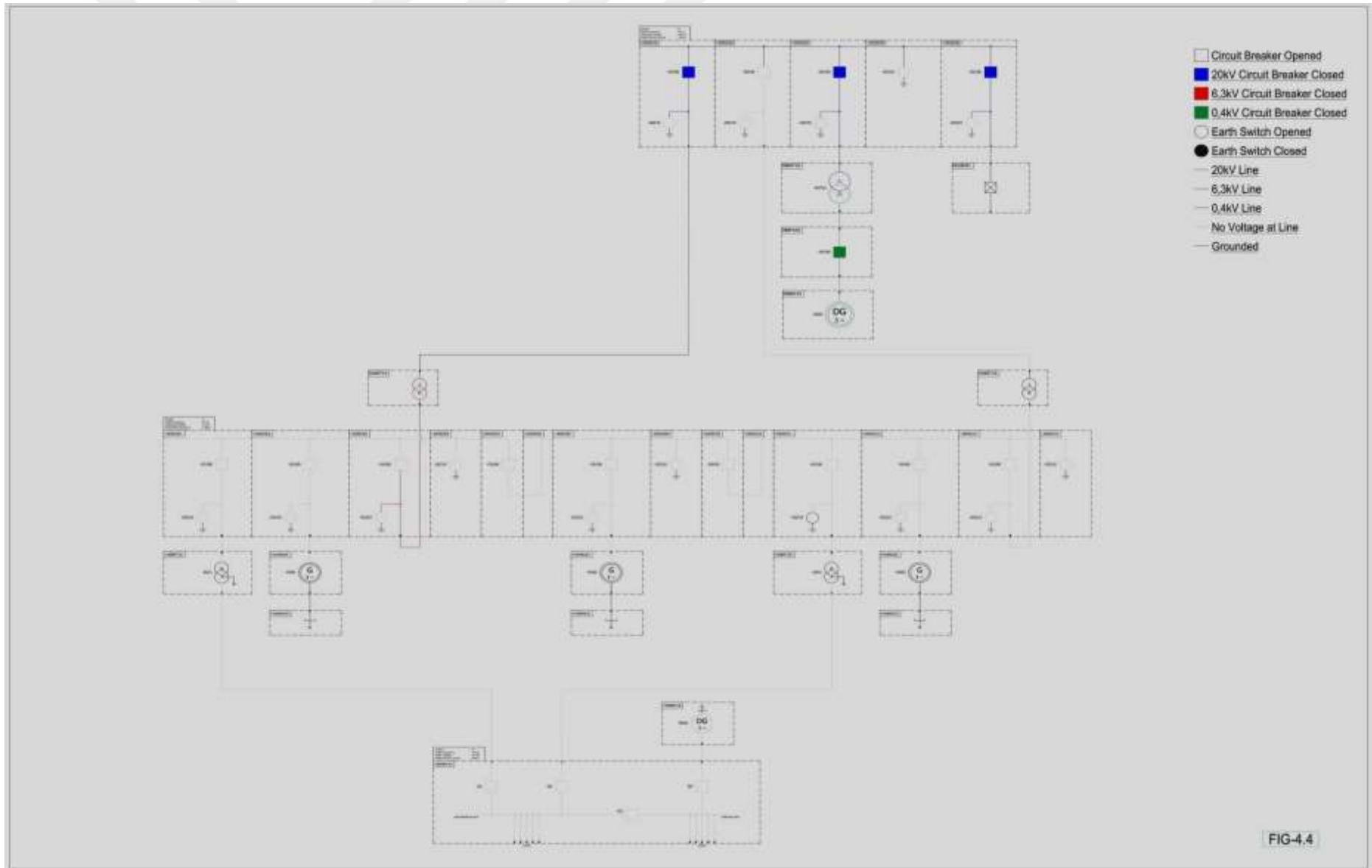
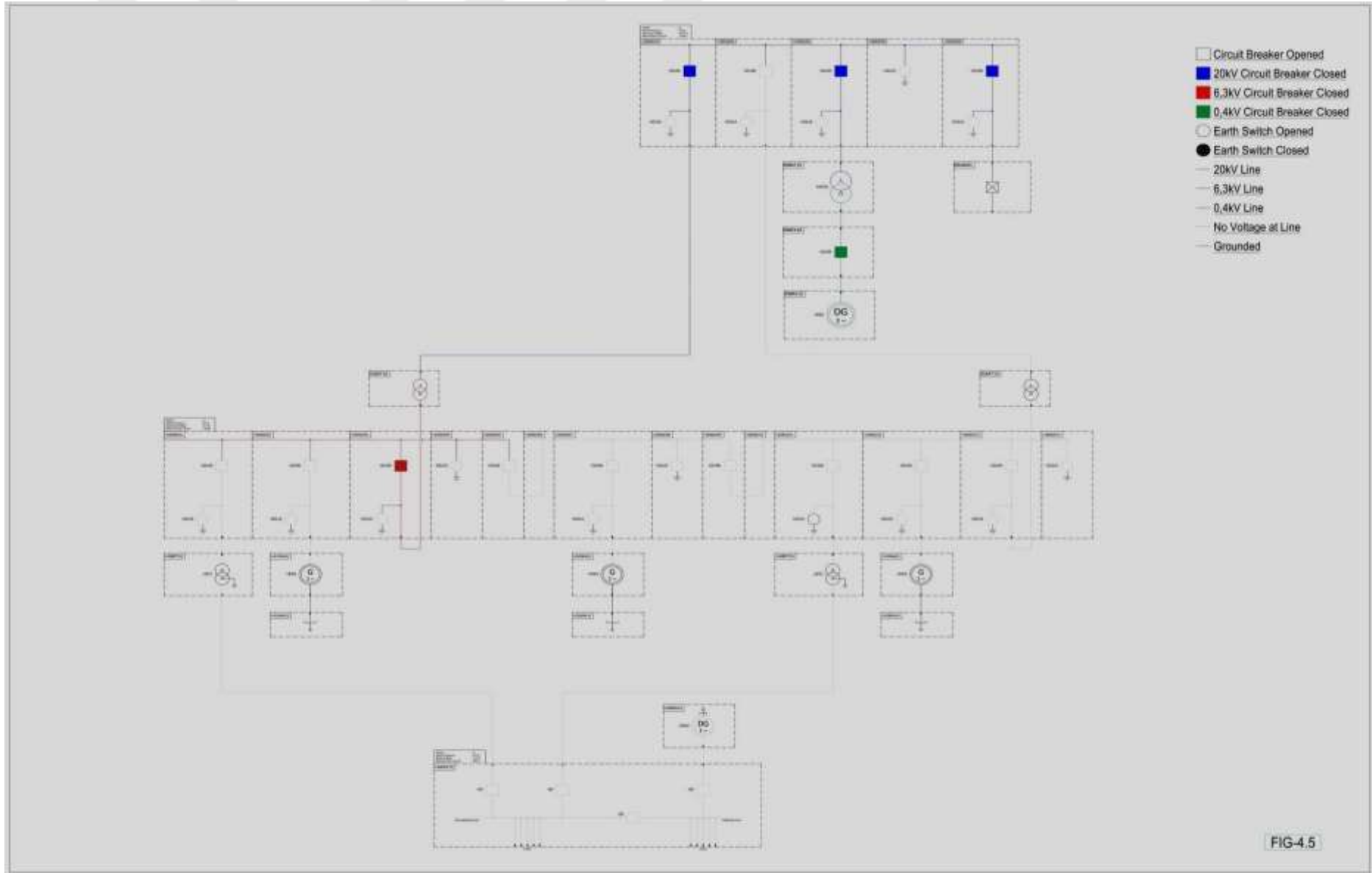


FIG-4.1









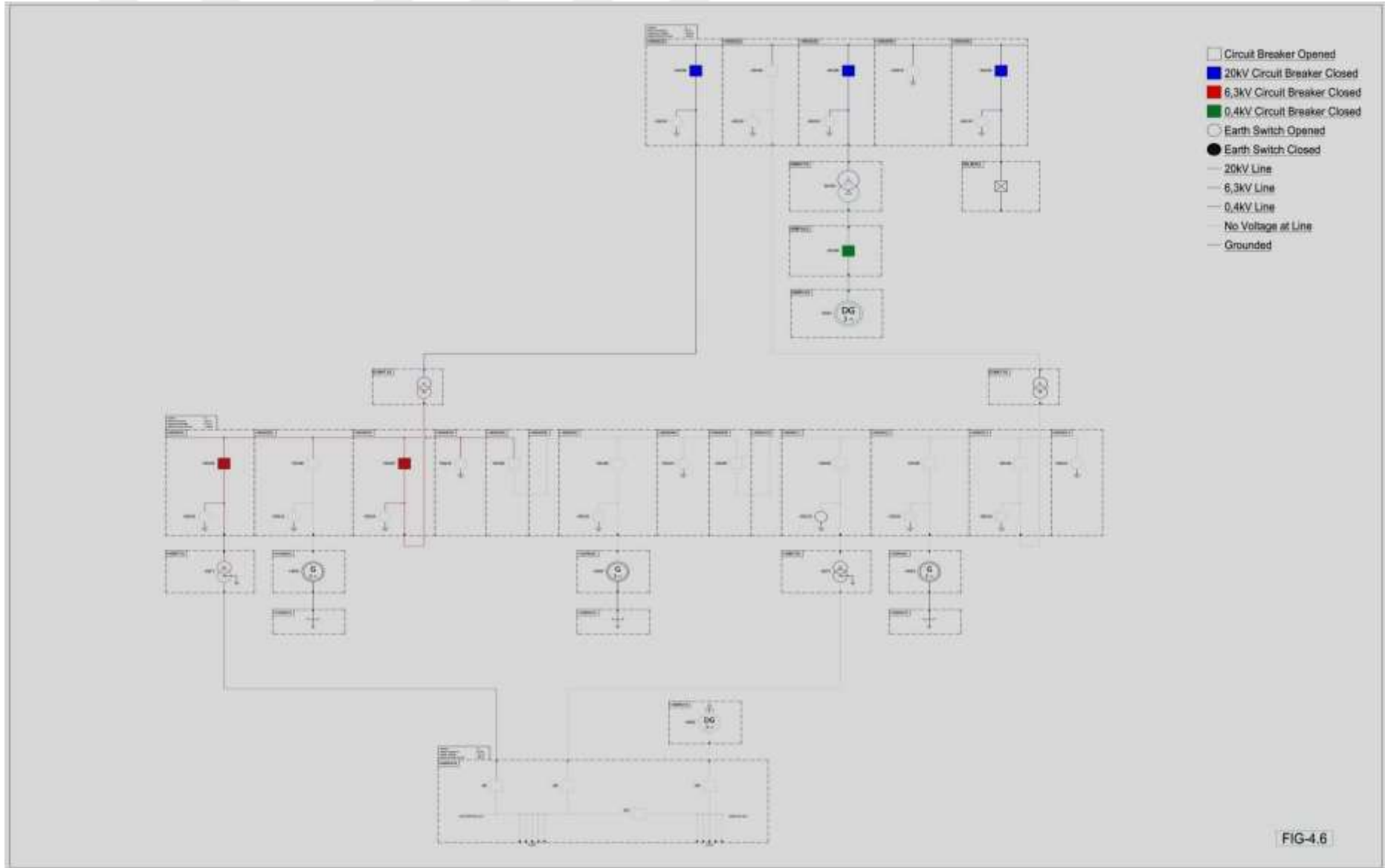




FIG-4.8

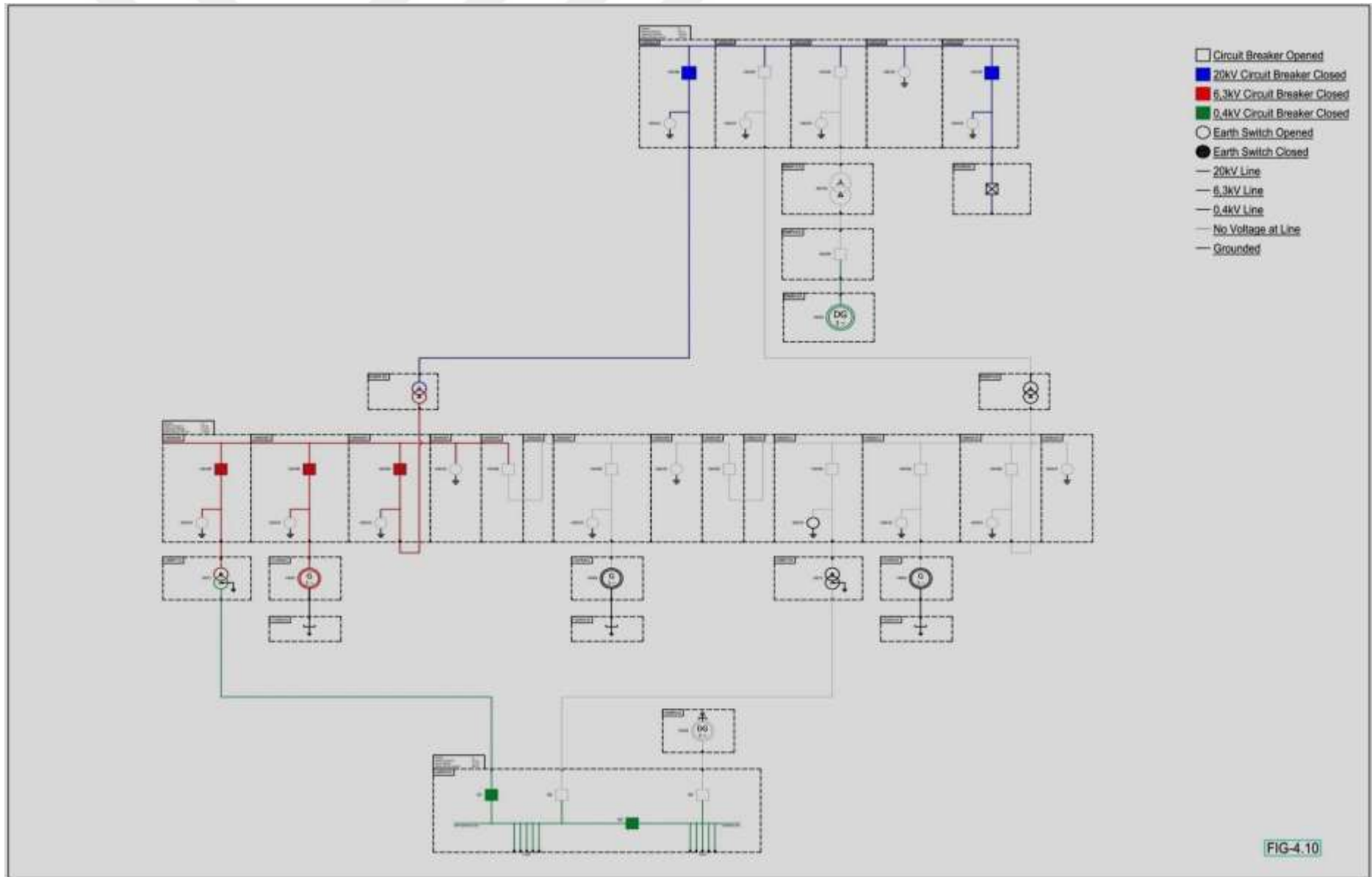




FIG-4.9

